

**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE YOGUR EN LA  
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA**

**TRABAJO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO QUÍMICO**

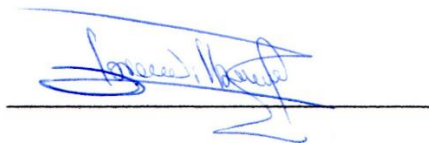
**AUTOR: CRISTIAN MARCELO RAMÍREZ TAPIA  
TUTOR: ING. LORENA ELIZABETH VILLARREAL VILLOTA MSc.**

**QUITO  
2014**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutora del trabajo de grado, titulado “DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE YOGUR EN LA FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA”, me permito certificar que el mismo es original y ha sido desarrollado por el señor CRISTIAN MARCELO RAMÍREZ TAPIA, bajo mi dirección y conforme con todas las observaciones realizadas, considero que el trabajo está concluido y tiene mi aprobación.

En la ciudad de Quito, a los 08 días del mes de Agosto de 2014.



Ing. Lorena Elizabeth Villareal Villota MSc.  
PROFESOR TUTOR

## **AUTORIZACIÓN DE LA AUTORIA INTELECTUAL**

Yo, CRISTIAN MARCELO RAMÍREZ TAPIA en calidad de autor del trabajo de grado realizado sobre DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE YOGUR EN LA FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 08 días del mes de Agosto de 2014



---

Cristian Marcelo Ramírez Tapia

C.C. 1717646291

[cristianramirez88@hotmail.com](mailto:cristianramirez88@hotmail.com)

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Felix y Piedad por brindarme su apoyo incondicional y enseñarme el valor del trabajo y la constancia. A mis hermanos Carla y Pedro quienes son mi razón para continuar, por ser mis amigos y confidentes. A mis amigos por compartir sus conocimientos y su confianza tanto dentro como fuera de las aulas.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería Química por acogerme en sus brazos y en sus aulas impartirme el conocimiento adquirido para ser un profesional digno de la Universidad Central del Ecuador.

A los profesores que actualmente imparten su cátedra en la Facultad de Ingeniería Química y en especial a quienes fueron mis profesores por compartir su experiencia y sus valores.

A la Ing. Lorena Villareal por guiarme en el desarrollo de este trabajo de grado.

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
ANEXOS .....	xv
RESUMEN .....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	1
 1. MARCO TEÓRICO.....	 2
1.1. Leche.....	2
1.1.1. <i>Composición</i> .....	2
1.1.2. <i>Propiedades fisicoquímicas para el diseño</i> . ....	3
1.1.3. <i>Esterilización</i> .....	4
1.2. Yogur. ....	7
1.2.1. <i>Origen</i> . ....	8
1.2.2. <i>Historia</i> . ....	8
1.2.3. <i>Ventajas</i> .....	8
1.2.4. <i>Componentes</i> . ....	9
1.2.5 <i>Diagrama de bloques de la planta piloto para producción de yogur</i> . ....	11
1.2.6. <i>Etapas de la producción de yogur</i> . ....	12
1.3. Equipos y ecuaciones de diseño. ....	18
1.3.1. <i>Equipos de transferencia de calor</i> . ....	18
1.3.2. <i>Tanques y recipientes</i> . ....	29
1.3.3. <i>Agitadores</i> . ....	31
1.3.4. <i>Bombas</i> .....	36
1.3.5. <i>Tuberías</i> . ....	42
 2. MARCO EXPERIMENTAL.....	 45
2.1. Definición de variables de diseño.....	45
2.2. Caracterización de la materia prima. ....	46

2.2.1. <i>Determinación del contenido de grasa.</i>	47
2.2.2. <i>Determinación de humedad.</i>	47
2.2.3. <i>Determinación de viscosidad.</i>	47
2.2.4. <i>Determinación de densidad.</i>	47
2.2.5. <i>Determinación de pH</i>	47
2.2.6. <i>Determinación de contenido de sólidos.</i>	47
2.3. <i>Elaboración de yogur.</i>	48
2.4. <i>Análisis del yogur elaborado en el laboratorio.</i>	50
2.4.1. <i>Determinación de viscosidad.</i>	50
2.4.2. <i>Determinación de densidad.</i>	50
3. DATOS EXPERIMENTALES	51
3.1. <i>Caracterización de la materia prima.</i>	51
3.2. <i>Elaboración de yogur.</i>	53
3.3. <i>Análisis del yogur.</i>	54
4. CÁLCULOS	56
4.1. <i>Escalado.</i>	56
4.2. <i>Balance de masa por equipos.</i>	57
4.2.1. <i>Balance de masa en la etapa de pasteurización.</i>	58
4.2.2. <i>Balance de masa en la etapa de fermentación y mezcla.</i>	61
4.3. <i>Procedimiento de cálculo de los equipos.</i>	63
4.3.1. <i>Diseño del tanque de recepción V-110.</i>	63
4.3.2. <i>Diseño del Pasteurizador E-201. Constará de 3 intercambiadores de placas.</i>	63
4.3.3. <i>Diseño del fermentador R-200.</i>	64
4.3.4. <i>Diseño del pre-calentador de la leche E-210. (Intercambiador de calor de tubo concéntrico.)</i>	64
4.3.5. <i>Diseño del enfriador de yogur E-220. (Intercambiador de calor de tubo concéntrico.)</i>	64
4.3.6. <i>Especificación de la envasadora.</i>	64
4.3.7. <i>Especificación del cuarto frío.</i>	64
4.3.8. <i>Especificación de bombas</i>	64
4.4. <i>Diseño del tanque de recepción (silo) V-110:</i>	65
4.4.1. <i>Volumen del tanque V-110.</i>	65
4.4.2. <i>Dimensiones del tanque V-110.:</i>	65
4.4.3. <i>Potencia del agitador del tanque V-110.</i>	66
4.5. <i>Diseño del pasteurizador E-201.</i>	68
4.5.1. <i>Tanque de balance V-120.</i>	68

4.5.2. Programa de temperaturas en el pasteurizador E-201.....	69
4.5.3. <i>Cálculo para la zona de calentamiento:</i> .....	72
4.5.4. <i>Cálculo para la zona de regeneración:</i> .....	81
4.5.5. <i>Cálculo para la zona de enfriamiento:</i> .....	85
4.5.6. <i>Cálculo para la zona de retención.</i> .....	88
4.6. Diseño del tanque fermentador R-200. ....	90
4.6.1. <i>Volumen del tanque R-200.</i> .....	91
4.6.2. <i>Dimensiones del tanque fermentador R-200.</i> .....	92
4.6.3. <i>Potencia del agitador del fermentador R-200.</i> .....	92
4.6.4. <i>Masa del fermentador R-200:</i> .....	93
4.6.5. <i>Balance de energía.</i> .....	94
4.7. Diseño del pre calentador E-210 y el enfriador E-220.....	103
4.7.1. <i>Diseño del pre calentador E-210.</i> .....	104
4.7.2. <i>Diseño del enfriador E-220.</i> .....	107
4.8. Equipos y recipientes adicionales.....	111
4.8.1. <i>Tanques para agua fría</i> .....	111
4.8.2. <i>Calentador de agua E-110.</i> .....	112
4.8.3. <i>Mezclador estático M -210.</i> .....	112
4.8.4. <i>Envasadora PK-210.</i> .....	112
4.8.5. <i>Cámara de refrigeración o cuarto frío CR-210.</i> .....	112
4.9. Cálculo de bombas. ....	113
4.9.1. <i>Cálculo modelo para la bomba P-111</i> .....	112
4.10. Estimación del costo de la planta.....	114
 5.RESULTADOS.....	 116
5.1. Dimensiones del tanque de almacenamiento V-110. ....	116
5.2. Dimensiones del tanque de balance V-120.....	116
5.3. Especificación de la tubería. ....	117
5.4. Especificaciones del pasteurizador E-100. ....	117
5.4.1. <i>Especificaciones de las placas.</i> .....	117
5.4.2. <i>Especificaciones del pasteurizador.</i> .....	117
5.5. Especificaciones del pre calentador de leche.....	119
5.6. Especificaciones del fermentador.....	119
5.7. Especificaciones del enfriador de yogur.....	120
5.8. Especificaciones de bombas.....	121
5.9. Especificaciones de la envasadora.....	121
5.10. Especificaciones de la cámara de frío.....	121



6. DISCUSIÓN .....	123
6.1. Caracterización de la materia prima. ....	123
6.2. Escalado. ....	123
6.3. Diseño del pasteurizador. ....	123
6.4. Diseño del fermentador. ....	124
6.5. Diseño de intercambiadores de calor. ....	124
6.6. Especificaciones de otros equipos. ....	125
7. CONCLUSIONES .....	126
7.1. Caracterización de la materia prima. ....	126
7.2. Escalado. ....	126
7.3. Diseño del pasteurizador. ....	126
7.4. Diseño del fermentador. ....	126
7.5. Diseño de los intercambiadores de calor. ....	127
8. RECOMENDACIONES .....	128
8.1. Pasteurizador. ....	128
8.2. Fermentador. ....	128
8.3. Especificaciones de otros equipos. ....	128
CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....	129
BIBLIOGRAFÍA .....	132
ANEXOS .....	134

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición de la leche procedente de diferentes especies animales .....	2
Tabla 2. Composición cuantitativa de la leche .....	3
Tabla 3. Requisitos fisicoquímicos de la leche cruda .....	7
Tabla 4. Correlaciones de Thonon.....	23
Tabla 5. Variables de diseño de la planta piloto .....	45
Tabla 6. Corrientes que intervienen en el diagrama de flujo .....	46
Tabla 7. Abreviaturas usadas en los cálculos .....	46
Tabla 8. Propiedades de la leche cruda.....	51
Tabla 9. Viscosidad de la leche a diferentes temperaturas (velocidad cizallamiento $50 \text{ s}^{-1}$ ) .....	51
Tabla 10. Densidad de la leche a diferentes temperaturas .....	52
Tabla 11. Propiedades térmicas de la leche a diferentes temperaturas.....	53
Tabla 12. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 1 .....	53
Tabla 13. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 2. ....	54
Tabla 14. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 3 .....	54
Tabla 15. Viscosidad del yogur a diferentes temperaturas (velocidad cizallamiento $50 \text{ s}^{-1}$ ) .....	54
Tabla 16. Densidad del yogur a diferentes temperaturas .....	55
Tabla 17. Cantidad de materia prima usada en el marco experimental .....	56
Tabla 18. Cantidad de materia prima por lote de producción .....	57
Tabla 19. Balance de masa en el tanque de balance V-120 .....	59
Tabla 20. Balance de masa en la zona de regeneración del pasteurizador (Lado frío) .....	60
Tabla 21. Balance de masa en la zona de calentamiento del pasteurizador .....	60
Tabla 22. Balance de masa en la zona de regeneración del pasteurizador (Lado caliente) .....	60
Tabla 23. Balance de masa en la zona de enfriamiento del pasteurizador .....	60
Tabla 24. Balance de masa en el pre calentador E-210.....	61
Tabla 25. Balance de masa en el fermentador R-200 .....	62
Tabla 26. Balance de masa en el enfriador E-220. ....	63
Tabla 27. Variables en el diseño del tanque V-110 .....	65
Tabla 28. Iteraciones del diámetro del tanque V-110 .....	66
Tabla 29. Dimensiones del agitador del tanque V-110.....	66

Tabla 30. Especificaciones de las placas del pasteurizador .....	68
Tabla 31. Variables en el diseño del tanque V-120 .....	69
Tabla 32. Iteraciones del diámetro del tanque V-120 .....	69
Tabla 33. Temperaturas en el pasteurizador E-201 .....	69
Tabla 34. Programa de Temperaturas en el pasteurizador P-201 .....	72
Tabla 35. Propiedades fisicoquímicas de la leche a $T_m=68,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	73
Tabla 36. Propiedades fisicoquímicas del agua a $t_m=77^{\circ}\text{C}$ .....	73
Tabla 37. Iteraciones en la zona de calentamiento del pasteurizador.....	79
Tabla 38. Propiedades fisicoquímicas de la leche a $T_m=43\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	82
Tabla 39. Propiedades fisicoquímicas de la leche a $t_m=49^{\circ}\text{C}$ .....	82
Tabla 40. Iteraciones en la zona de regeneración del pasteurizador .....	83
Tabla 41. Propiedades fisicoquímicas de la leche a $T_m=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	85
Tabla 42. Propiedades fisicoquímicas del agua a $t_m=16^{\circ}\text{C}$ .....	85
Tabla 43. Iteraciones en la zona de enfriamiento del pasteurizador.....	86
Tabla 44. Diámetro de la tubería de retención .....	89
Tabla 45. Masa de materia prima introducida en el fermentador.....	91
Tabla 46. Variables en el diseño del tanque R-200 .....	91
Tabla 47. Iteraciones del diámetro del tanque R-200 .....	92
Tabla 48. Dimensiones del agitador del fermentador R-200 .....	93
Tabla 49. Propiedades del acero inoxidable AISI 316.....	94
Tabla 50. Masa de la marmita .....	94
Tabla 51. Propiedades de la corriente Y1 .....	95
Tabla 52. Datos para el cálculo del coeficiente de convección interno, $h_{ci}$ .....	97
Tabla 53. Datos para el cálculo del coeficiente de radiación, $h_{ro}$ .....	98
Tabla 54. Datos para el cálculo del flujo de calor.....	98
Tabla 55. Propiedades térmicas del poliuretano .....	99
Tabla 56. Datos para el cálculo de los coeficientes de convección y radiación .....	100
Tabla 57. Datos para el cálculo del flujo de calor.....	102
Tabla 58. Temperaturas a la entrada y salida del pre calentador y enfriador. ....	103
Tabla 59. Dimensiones de la tubería. ....	104
Tabla 60. Áreas de flujo y diámetro equivalente del intercambiador E-210 y E-220. ....	104
Tabla 61. Propiedades fisicoquímicas de la leche a $T_m=32\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	105
Tabla 62. Propiedades fisicoquímicas del agua a $t_m=67\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	105
Tabla 63. Cálculo de números adimensionales pre-calentador E-210.....	106
Tabla 64. Pérdida de carga pre-calentador E-210 .....	107
Tabla 65. Propiedades fisicoquímicas del yogur a $T_m= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	108

Tabla 66. Propiedades fisicoquímicas del agua a $t_m=19\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	108
Tabla 67. Cálculo de números adimensionales enfriador E-220.....	109
Tabla 68. Pérdida de carga enfriador E-220 .....	111
Tabla 69. Datos de alturas de succión y descarga del fluido en cada bomba .....	113
Tabla 70. Estimación de costos equipos principales.....	114
Tabla 71. Estimación de costos equipos auxiliares y accesorios .....	115
Tabla 72. Dimensiones del tanque V-110.....	116
Tabla 73. Especificaciones del agitador del tanque V-110 .....	116
Tabla 74. Dimensiones del tanque V-120.....	116
Tabla 75. Especificación de la tubería de la planta.....	117
Tabla 76. Especificaciones del pasteurizador E-100 .....	117
Tabla 77. Especificaciones de la zona de calentamiento .....	117
Tabla 78. Especificaciones de la zona de regeneración .....	118
Tabla 79. Especificaciones de la zona de enfriamiento .....	118
Tabla 80. Especificación del tubo de retención .....	118
Tabla 81. Especificaciones del pre calentador E-210 .....	119
Tabla 82. Dimensiones del fermentador R-200 .....	119
Tabla 83. Especificaciones del agitador del fermentador R-200.....	120
Tabla 84. Especificaciones del enfriador E-220 .....	120
Tabla 85. Especificaciones del enfriador E-220 .....	121
Tabla 86. Especificaciones de la envasadora PK-210.....	121
Tabla 87. Especificaciones de la cámara fría CR-210 .....	121
Tabla 88. Estimación de costos totales .....	122

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curvas de destrucción temperatura = $f(\text{Tiempo})$ de algunas enzimas y microorganismos .....	5
Figura 2. Logaritmo del número de supervivientes = $f(\text{Temperatura})$ .....	5
Figura 3. Logaritmo del Tiempo de esterilización = $f(\text{Temperatura})$ .....	6
Figura 4. Diagrama de bloques de la planta piloto para producción de yogur .....	11
Figura 5. Pasteurizador con intercambiador de calor de placas .....	12
Figura 6. División por zonas en un pasteurizador de placas .....	13
Figura 7. Trayecto de los fluidos en un pasteurizador .....	13
Figura 8. Tanque pasteurizador .....	14
Figura 9. Mecanismo de reacción en la fermentación láctica .....	15
Figura 10. Etapas simplificadas de influencia de un ácido y un álcali sobre la caseína respectivamente.....	16
Figura 11. Intercambiador de calor de tubo concéntrico para el enfriamiento del yogur .....	17
Figura 12. Envasadora semiautomática .....	17
Figura 13. Cuarto frío para el enfriamiento y almacenamiento del yogur .....	18
Figura 14. Intercambiador de calor de placas .....	19
Figura 15. Flujo en un intercambiador de calor de placas .....	19
Figura 16. Esquema de un intercambiador de calor de flujo concéntrico .....	25
Figura 17. Tanque silo.....	29
Figura 18. Tanque de almacenamiento .....	30
Figura 19. Depósito de mezcla .....	30
Figura 20. Tanque de proceso .....	31
Figura 21. Partes del equipo de un tanque agitado .....	32
Figura 22. Partes del equipo de un tanque agitado .....	33
Figura 23. Dimensiones y condiciones de instalación para diferentes tipos de agitadores .....	34
Figura 24. Carta del número de potencia para agitadores .....	35
Figura 25. Carta del tiempo de mezcla para agitadores .....	36
Figura 26. Bomba centrífuga.....	37
Figura 27. Esquema de alturas estáticas de una bomba .....	38

Figura 28. Partes de una bomba centrífuga.....	39
Figura 29. Curvas características en bombas centrífugas .....	40
Figura 30. Funcionamiento de una bomba de desplazamiento positivo (bomba de rotor lobu- lado) .....	41
Figura 31. Bomba de rotor lobulado.....	42
Figura 32. Fotografía del flujo laminar en una tubería .....	43
Figura 33. Fotografía del flujo de transición en una tubería .....	43
Figura 34. Fotografía del flujo turbulento en una tubería. ....	44
Figura 35. Corrientes en el punto de balance de masa tanque de balance V-120.....	59
Figura 36. Corrientes en el punto de balance de masa pasteurizador E-100 .....	59
Figura 37. Corrientes en el punto de balance de masa pre calentador E-210.....	61
Figura 38. Corrientes en el punto de balance de masa fermentador R-200.....	62
Figura 39. Corrientes en el punto de balance de masa enfriador E-220.....	62
Figura 40. Relaciones geométricas para un agitador tipo turbina de 6 aspas .....	66
Figura 41. Gráfico de una placa del pasteurizador.....	68
Figura 42. Relaciones geométricas para un agitador de ancla .....	92
Figura 43. Flujo de calor en el fermentador R-200.....	95
Figura 44. Flujo de calor en el fermentador R-200 con aislamiento .....	100
Figura 45. Especificaciones de los tanques de polietileno .....	112

## ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Diagrama de flujo del proceso. ....	135
ANEXO B. Resultados del análisis de la leche cruda. ....	136
ANEXO C. Análisis de la materia prima y pasteurización. ....	137
ANEXO D. Elaboración y análisis del yogur. ....	138
ANEXO E. Recopilación de datos de viscosidad de la leche en función de la temperatura. ....	139
ANEXO F. Recopilación de datos de viscosidad del yogur en función de la temperatura. ....	140
ANEXO G. Trazado para la determinación del número de potencia del agitador en el tanque V-110. ....	141
ANEXO H. Trazado para la determinación del tiempo de homogenización en el tanque V-110. ....	142
ANEXO J. Trazado para la determinación del número de potencia del agitador del tanque R-200. ....	143
ANEXO K. Constantes para convección en superficies isotermas. ....	144

# **DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE YOGUR EN LA FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA.**

## **RESUMEN**

Diseño y especificaciones de equipos para una planta productora de yogur a pequeña escala, en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

A nivel de laboratorio se elaboró yogur artesanalmente partiendo de 1 Litro de leche cruda como materia prima, a la cual previamente se analizó el contenido de grasa y humedad; se midieron densidad y viscosidad y se calcularon las propiedades térmicas del fluido mediante ecuaciones empíricas. Para la fermentación láctica se utilizó un cultivo liofilizado, azúcar y saborizante. Se realizaron 3 ensayos para obtener el tiempo promedio en el cual la fermentación se completa, este correspondió a 5 horas y media.

Para el escalado se definió la capacidad de la planta piloto para el tratamiento de 100 litros de leche y se determinó la cantidad de aditivos. Se realizó un diagrama de flujo del proceso, con corrientes de entrada y salida en cada equipo. Se dimensionaron los siguientes equipos: un pasteurizador, intercambiadores de calor de placas y de tubo concéntrico, tanques, bombas y un reactor para la fermentación láctica

Se concluye que la planta piloto está en capacidad para producir 106 L de yogur, a partir de 100 L de leche cruda mediante las etapas de pasteurización, pre calentamiento, fermentación, enfriamiento con posterior envasado y refrigeración.

**PALABRAS CLAVES:** / DESARROLLO DE PLANTAS PILOTO/ YOGUR / FERMENTACIÓN LÁCTICA/ PASTEURIZACIÓN/ INTERCAMBIADORES DE CALOR/ BOMBAS/



# **DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE YOGUR EN LA FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA.**

## **ABSTRACT**

Design and specifications of equipment for a small-scale yoghurt pilot plant producing, at the Chemical Engineering Faculty at the Universidad Central del Ecuador.

Yoghurt was prepared in laboratory starting from 1 liter of raw milk as a raw material. Previously, the fat and moisture content was analyzed. Density and viscosity were measured and thermal properties of the fluid were calculated using empirical equations. In lactic fermentation to a lyophilised culture, sugar and flavoring were used. Three tests were performed to obtain the average time in which the fermentation is complete. This corresponded to 5 ½ hours.

For scaling pilot, the capacity to treat 100 L of milk plant was defined and the amount of additive was determined. A flowchart of this process, including input and output streams on each team were performed. A pasteurizer, plate and concentric tube heat exchangers, tanks, pumps and reactor for lactic fermentation were sized.

To conclude, the pilot plant is capable to produce 106 L of yoghurt from 100 L of raw milk by pasteurization stage, pre heating, fermentation, cooling with subsequent packaging and refrigeration.

**KEYWORDS:** / DEVELOPMENT PILOT PLANT / YOGHURT / LACTIC FERMENTATION  
/ PASTEURIZATION / HEAT EXCHANGER / PUMPS /

## INTRODUCCIÓN

Ecuador casi dobló sus exportaciones de productos lácteos desde 2008, lo que enfatizó la importancia de la diversificación del sector. En 2008 el país vendió en el exterior productos lácteos por valor de 2,7 millones de dólares, frente a los 5 millones del 2010 según datos divulgados por el Ministerio de Industrias y Productividad.

Quesos, yogures y dulces de leche se exportaron a Estados Unidos, Europa, Japón, Rusia y también a otros países latinoamericanos. Tres cuartas partes de la producción de leche de Ecuador se concentran en el área andina. Entre 2010 y 2013 la producción diaria de leche aumentó cerca del 12 % cada mes, pero su gran mayoría se destina al mercado interno.

Los precios de productos lácteos para el mes de marzo de 2013, mostraron un crecimiento de 11%, respecto al mes anterior (Febrero 2013). Según la FAO, la causa de la subida de los precios fue el prolongado clima seco y caluroso en Oceanía, que condujo a una caída abrupta de la producción de leche junto a una disminución de la elaboración de productos lácteos en dicho continente.

A partir de estos datos el estudio de la actividad a nivel industrial en lácteos se torna importante para la competencia con mercados internacionales por lo que es necesario familiarizarse con la tecnología de lácteos para aportar en el crecimiento económico del país.

La Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador se ha caracterizado por realizar estudios en el área de Petróleos y recientemente en biomasa, sin embargo ha dejado de lado el área de biotecnología y alimentos, área que también forma parte de la Ingeniería Química.

Con el objeto de empezar a realizar estudios en el área de la pasteurización y la fermentación se ha decidido implementar una planta piloto enfocada en la producción de lácteos; inicialmente para producción de yogur y posteriormente podría ampliarse a queso, crema y mantequilla con los beneficios de estudiar el aprovechamiento de sustancias intermedias como el suero.

Este trabajo propone una planta piloto para el estudio de lácteos y su funcionalidad abarca un laboratorio de Operaciones Unitarias.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Leche

La leche es una emulsión de color blanquecino opaco producida por las glándulas mamarias de las hembras de los mamíferos. La leche de algunos de los mamíferos domésticos forma parte de la alimentación humana corriente en la inmensa mayoría de las civilizaciones: de vaca, principalmente, pero también de búfala, oveja, cabra, yegua, camella, alce, cerda, etc. [1]

**Tabla 1. Composición de la leche procedente de diferentes especies animales**

<b>Especie</b>	<b>Proteína Total %</b>	<b>Caseína %</b>	<b>Seroproteína %</b>	<b>Grasa %</b>	<b>Carbohidratos %</b>	<b>Cenizas %</b>
Humana	1.2	0.5	0.7	3.8	7.0	0.2
Cabra	3.6	2.7	0.9	4.1	4.7	0.8
Vaca	3.5	2.8	0.7	3.7	4.8	0.7
Oveja	5.8	4.9	0.9	7.9	4.5	0.8

**Fuente:** DAIRY PROCESSING HANDBOOK, Tetra Pak Processing Systems, Lund, Suecia, 1995, p. 2

Para la producción de yogur y de otros derivados la industria láctea usa como materia prima la leche de vaca (*Bos Taurus*), que será usada en la planta.

**1.1.1. Composición.** La leche está constituida por agua, grasas, proteínas, azúcares, vitaminas y minerales, además de otras sustancias que están presentes en menor concentración y que en conjunto forman un sistema fisicoquímico estable de más de 450 compuestos; esto se debe a que todos sus ingredientes se encuentran en equilibrio, estableciendo diversos estados de dispersión. Los sólidos totales (grasa y sólidos no grasos) representan del 11 al 15% de su composición y varían de acuerdo con muchos factores, tales como raza y edad de la vaca, tipo y frecuencia de la alimentación, estado de lactación, temperatura ambiente, enfermedades, época del año, hora del día del ordeño, etc. [2]

**Tabla 2. Composición cuantitativa de la leche**

Constituyente principal	Límites de variación	Valor medio
Agua	85.5 - 89.5	87.5
Sólidos totales	10.5 - 14.5	13.0
Grasa	2.5 - 6.0	3.9
Proteínas	2.9 - 5.0	3.4
Lactosa	3.6 - 5.5	4.8
Minerales	0.6 - 0.9	0.8

**Fuente:** DAIRY PROCESSING HANDBOOK, Tetra Pak Processing Systems, Lund, Suecia, 1995, p. 18

**1.1.2. Propiedades fisicoquímicas para el diseño.** El diseño y control de los procesos de transformación de la leche se realiza mediante la medición y el cálculo de las propiedades fisicoquímicas.

**1.1.1.1. Densidad.** La densidad es una propiedad fisicoquímica que varía con la temperatura y relaciona la cantidad de masa que se encuentra en un determinado volumen del fluido, se utiliza para los balances de masa en cada etapa.

**1.1.1.2. Propiedades reológicas.** La leche puede comportarse como un fluido newtoniano o no newtoniano dependiendo de su composición [3], temperatura y tratamientos previos.

Las leches entera y descremada se comportan como fluidos *newtonianos* bajo las siguientes condiciones:

- Contenido graso inferior a 40% (p/p).
- Temperatura superior a 40 °C.
- Moderados gradientes de deformación.

La caseína y los glóbulos grasos tienen una amplia influencia en la viscosidad de la leche, las proteínas y la lactosa contribuyen minoritariamente en la viscosidad. Si la temperatura de la leche es inferior a los 40 °C, puede presentarse coalescencia por frío de los glóbulos grasos y el fluido cambia su comportamiento a *no newtoniano*.

**1.1.1.3. Calor específico.** Es una propiedad que indica la cantidad de energía que se necesita para provocar un cambio en la temperatura, esta propiedad es indispensable para el diseño de los equipos que realizan tratamientos térmicos.

Para la leche puede calcularse utilizando la siguiente ecuación en un rango de temperaturas de 40 a 70 °C (McCarthy & Singh, 2009).

$$C_p = 41.8W + (13.71 + 0.1129\theta) \times TS \quad (1)$$

En donde:

$C_p$ : Capacidad Calórica [J/kg K].

$W$ : Contenido de agua (%).

$TS$ : Sólidos no grasos (%).

**1.1.1.4. Conductividad térmica.** Es una propiedad térmica que indica la capacidad de los materiales para conducir calor, esta propiedad en la leche aumenta con la temperatura y disminuye con el contenido de sólidos totales y grasa.

La ecuación para el cálculo de la conductividad térmica es la siguiente (McCarthy & Singh, 2009):

$$k = (0.528 + 2.13 \times 10^{-3}T - 7.32 \times 10^{-6}T^2) \times [1 - (0.843 + 1.9 \times 10^{-3}T)F] \quad (2)$$

En donde

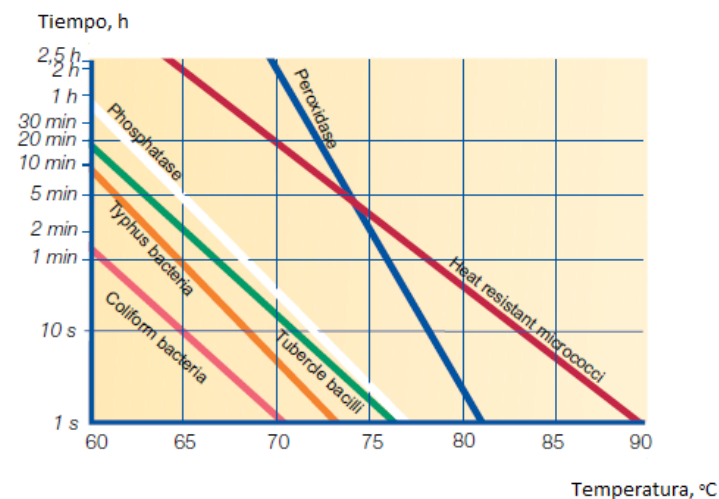
$k$ : Conductividad Térmica (W/m K).

$T$ : Temperatura (°C)

$F$ : Contenido de grasa (%).

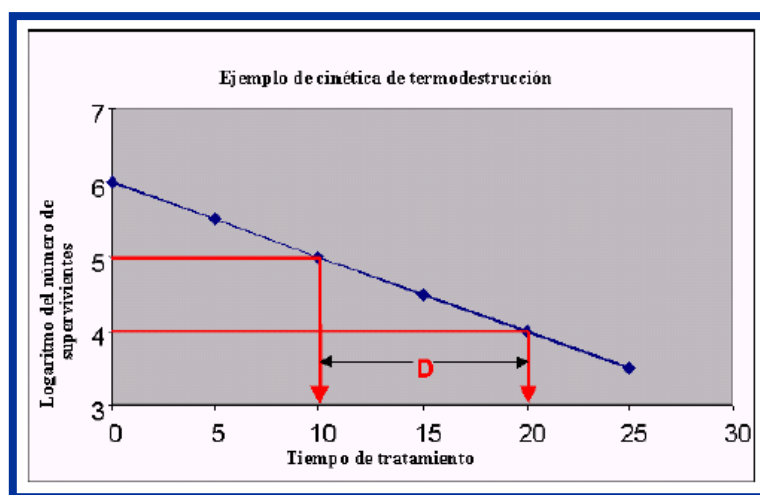
**1.1.1.5. pH.** El pH representa la acidez actual de la leche y es una propiedad crítica al momento de la producción del yogur, se puede estimar con un potenciómetro o pH-metro.

**1.1.3. Esterilización.** La esterilización consiste en la eliminación de todos los microorganismos que contiene un objeto o sustancia, en el caso de la leche se requiere de una esterilización térmica para destruir las bacterias coliformes, según investigaciones se ha determinado temperatura y tiempo de muerte para algunos microorganismos (ver figura 1).



**Figura 1. Curvas de destrucción temperatura =  $f(\text{Tiempo})$  de algunas enzimas y microorganismos**

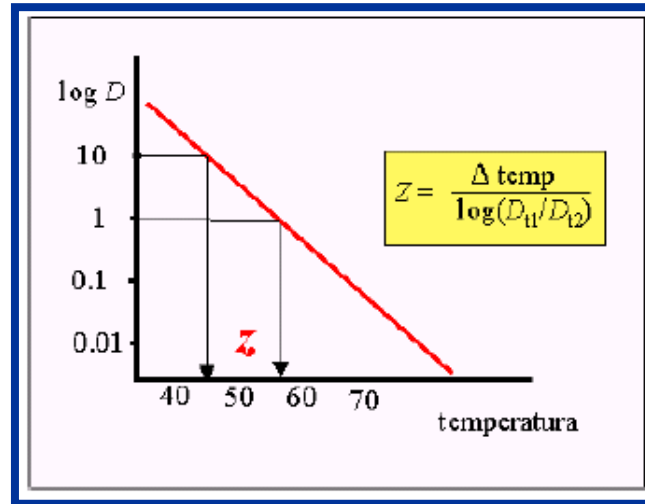
**1.1.3.1. Valor D.** Se define el valor D como el tiempo necesario para que el número de supervivientes caiga al 10% del valor inicial (o, lo que es lo mismo, para que el logaritmo del número de supervivientes se reduzca en una unidad).



**Figura 2. Logaritmo del número de supervivientes =  $f(\text{Temperatura})$**

El tiempo (D) varía para cada temperatura (de ahí el subíndice t) de forma que a mayores temperaturas el valor de D es menor, es diferente para distintos microorganismos, distintos entornos y diferentes condiciones fisiológicas. [4].

**1.1.3.2. Valor z.** Si aumentamos la temperatura de tratamiento, el valor de D disminuye de forma logarítmica. De manera análoga a como el valor D indicaba el tiempo necesario para lograr que el número de supervivientes se redujera al 10% de la población inicial, el valor z indica el incremento en la temperatura (medida en número de grados) necesario para que el valor D se reduzca a la décima parte del inicial. [5]



**Figura 3. Logaritmo del Tiempo de esterilización = f(Temperatura)**

**1.1.3.3. Esterilización de alimentos.** Desde el punto de vista de la salud alimentaria, se suele requerir un tratamiento 12D de los productos susceptibles de ser portadores de gérmenes patógenos (o que puedan dar lugar a intoxicaciones). Este tratamiento reduce en 12 órdenes de magnitud el número de supervivientes o bien, visto de otra forma, reduce en un factor de  $10^{-12}$  la probabilidad de supervivencia de un microorganismo dado. [6]

$$F_T = nD_T \quad (3)$$

En donde:

$F_T$ : Tiempo de esterilización térmica a una temperatura determinada.

$D_T$ : Tiempo de esterilización a una temperatura determinada.

n: Número de reducciones decimales.

Para el caso de la leche la pasteurización se basa en la reducción de concentración de un microorganismo con  $D_{63}=2,5$  minutos y  $z=4,3$  °C [7]. Para cambiar este valor a una temperatura deseada se utiliza la ecuación:

$$F_o = t \times 10^{\frac{T-T_o}{z}} \quad (4)$$

En donde:

t: Tiempo de esterilización en segundos.

T<sub>0</sub>: Temperatura de esterilización (nueva).

T: Temperatura de esterilización (inicial).

F<sub>0</sub>: Tiempo de esterilización a T<sub>0</sub>.

**Tabla 3. Requisitos fisicoquímicos de la leche cruda**

REQUISITOS	UNIDAD	MIN.	MAX.	MÉTODO DE ENSAYO
Densidad relativa: a 15 °C A 20 °C	-	1,029 1,028	1,033 1,032	NTE INEN 11
Materia grasa	% (fracción de masa) <sup>4</sup>	3,0	-	NTE INEN 12
Acidez titulable como ácido láctico	% (fracción de masa)	0,13	0,17	NTE INEN 13
Sólidos totales	% (fracción de masa)	11,2	-	NTE INEN 14
Sólidos no grasos	% (fracción de masa)	8,2	-	*
Cenizas	% (fracción de masa)	0,65	-	NTE INEN 14
Punto de congelación (punto crioscópico) **	°C °H	-0,536 -0,555	-0,512 -0,530	NTE INEN 15
Proteínas	% (fracción de masa)	2,9	-	NTE INEN 16
Ensayo de reductasa (azul de metileno)***	h	3	-	NTE INEN 018
Reacción de estabilidad proteica (prueba de alcohol)	Para leche destinada a pateurización: No se coagulará por la adición de un volumen igual de alcohol neutro de 68 % en peso o 75 % en volumen; y para la leche destinada a ultrapasteurización: No se coagulará por la adición de un volumen igual de alcohol neutro de 71 % en peso o 78 % en volumen			NTE INEN 1500
Presencia de conservantes <sup>1)</sup>	-	Negativo		NTE INEN 1500
Presencia de neutralizantes <sup>2)</sup>	-	Negativo		NTE INEN 1500
Presencia de adulterantes <sup>3)</sup>	-	Negativo		NTE INEN 1500
Grasas vegetales	-	Negativo		NTE INEN 1500
Suero de Leche	-	Negativo		NTE INEN 2401
Prueba de Brucelosis	-	Negativo		Prueba de anillo PAL (Ring Test)
RESIDUOS DE MEDICAMENTOS VETERINARIOS <sup>5)</sup>	ug/l	----	MRL, establecidos en el CODEX Alimentarius CAC/MRL 2	Los establecidos en el compendio de métodos de análisis identificados como idóneos para respaldar los LMR del codex <sup>6)</sup>

\* Diferencia entre el contenido de sólidos totales y el contenido de grasa.  
 \*\* °C= °H · f, donde f= 0,9856  
 \*\*\* Aplicable a la leche cruda antes de ser sometida a enfriamiento  
 1) Conservantes: formaldehído, peróxido de hidrógeno, cloro, hipocloritos, cloraminas, lactoperoxidasa adicionada y dióxido de cloro.  
 2) Neutralizantes: orina, carbonatos, hidróxido de sodio, jabones.  
 3) Adulterantes: Harina y almidones, soluciones azucaradas o soluciones salinas, colorantes, leche en polvo, suero de leche, grasas vegetales.  
 4) "Fracción de masa de B, W<sub>s</sub>": Esta cantidad se expresa frecuentemente en por ciento, %. La notación "% (m/m)" no deberá usarse.  
 5) Se refiere a aquellos medicamentos veterinarios aprobados para uso en ganado de producción lechera.  
 6) Establecidos por el comité del Codex sobre residuos de medicamentos veterinarios en los alimentos

**Fuente:** NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 9:2012, Requisitos fisicoquímicos de la leche cruda, quinta revisión, Quito, 2012, p.3

## 1.2. Yogur

De acuerdo a FAO/OMS e INEN se entiende por yogur el producto lácteo coagulado, obtenido a través de la fermentación láctica por la acción de las bacterias (*Lactobacillus Bulgaricus* y



*Streptococcus Thermophilus*), con o sin aditivos adicionales, los microorganismos en el producto final deberán ser viables. [8]

**1.2.1. Origen.** Existen pruebas de la elaboración de productos lácteos en culturas que existieron hace 4500 años. Los primeros yogures fueron probablemente de fermentación espontánea, quizá por la acción de alguna bacteria del interior de las bolsas de piel de cabra usadas como recipientes de transporte de lácteos por las culturas que vivían en la actual Bulgaria.

**1.2.2. Historia.** Desde Turquía se introdujo en la totalidad de la península balcánica. El reconocido científico ruso, fundador de la ciencia de la inmunología y premio Nobel, Iliá Méchnikov, describe el yogur como un excelente agente antienvejecimiento.

La bacteria causante de la fermentación láctica fue descubierta en 1903 por el doctor búlgaro Stamen Grigoroff, quien publicó y presentó su trabajo científico dedicado al yogur ante el Instituto Pasteur de París, Francia. En su honor, la nueva bacteria descubierta fue llamada inicialmente “*Bacterium bulgaricum Grigoroff*”, aunque después pasó a denominarse “*Lactobacillus bulgaricus*”.

En 1972, la corporación japonesa “Meidji Group” compró la licencia para producir yogur búlgaro. En 2002 esa licencia se renovó por 20 años más. Los japoneses consideran al yogur búlgaro como uno de los tesoros más grandes del país y consumen anualmente 200 000 toneladas de este producto, realizando la fermentación con el agente original comprado en Bulgaria. “Kuup Schweiz” consiguió en 1997 la exclusividad para el mercado suizo. Otros países a los que se exporta el agente fermentador original son Francia, Alemania y Corea del Sur.

**1.2.3. Ventajas.** Los principales beneficios que el yogur brinda a nuestro organismo son:

- Generar tolerancia a la lactosa: Como antes mencionamos, este es un punto muy importante, para así aclarar que su consumo es posible entre las personas que no toleran los lácteos. Las bacterias ácido lácteas contienen lactasa (enzima que digiere la lactosa).
- Previene y mejora los síntomas de diarrea: esto se debe a que el yogur ayuda a reestablecer la flora bacteriana intestinal sana, que se destruye por las diarreas. Por otro lado este alimento fortalece nuestro sistema inmunológico ayudándolo a defenderse contra las infecciones.

- Reduce los valores de colesterol sanguíneo: diferentes estudios demuestran que el consumo de yogur desnatado baja los niveles de colesterol en sangre, en consecuencia este alimento debe formar parte de la dieta de aquellas personas que presentan riesgo cardiovascular.
- Gran fuente de calcio: las pérdidas diarias de este mineral en nuestro organismo deben ser repuestas a través de la dieta diaria. El calcio presente en el yogur se ha disuelto en el ácido láctico, haciéndose así más absorbible para nuestro sistema digestivo y para su fácil paso posterior a todo nuestro cuerpo. Es notable que destaquemos que este producto lácteo tiene efecto preventivo ante el cáncer de colon.

**1.2.4. Componentes.** Los principales componentes del yogur son:

- Leche cruda (de vaca: *Bos Taurus*).
- Cultivo iniciador.
- Azúcar o saborizantes.
- Estabilizantes.

**1.2.4.1. Cultivo iniciador o starter.** También es conocido como fermento, se utilizan para los productos lácteos acidificados. El fermento es añadido y se deja crecer bajo condiciones controladas. En el transcurso de la fermentación las bacterias producen sustancias que dan al producto sus características como acidez, sabor, aroma y consistencia. La caída de pH, que se produce cuando las bacterias fermentan la lactosa produce ácido láctico, tiene un efecto conservador y a la vez mejoran su valor nutritivo y digestibilidad.

Las bacterias usadas en la acidificación para la producción de yogur son *Lactobacillus Bulgaricus* y *Streptococcus Termophilus*. El cultivo se compra ya preparado (cultivo comercial), procedente de laboratorios especializados, lo que reduce los costos de un laboratorio adicional a la planta y además disminuye el riesgo de contaminación en etapas intermedias. Otra ventaja es que se puede adicionar directamente sin necesidad de propagación. [9]

**1.2.4.3. Azúcar o edulcorantes.** Se puede añadir glucosa o sacarosa para dar sabor al yogur en una proporción no mayor al 10%, en lugar de esto también se puede usar un edulcorante que no tiene valor nutritivo. También se pueden usar frutas cuyo contenido debe estar entre el 12-18%.

Si se añaden estas cantidades antes de la incubación se tiene un efecto adverso en las condiciones de fermentación ya que se altera la presión osmótica de la leche.

**1.2.4.3. Sustancias estabilizantes.** Los coloides hidrófilos tienen la propiedad de ligar agua, con ellos se aumenta la viscosidad del producto y contribuyen a la separación del suero en el mismo, si se exceden las cantidades se obtiene una consistencia de goma por lo que es necesario colocar entre el 0.5 y 1% de estabilizante.

### 1.2.5 Diagrama de bloques de la planta piloto para producción de yogur.

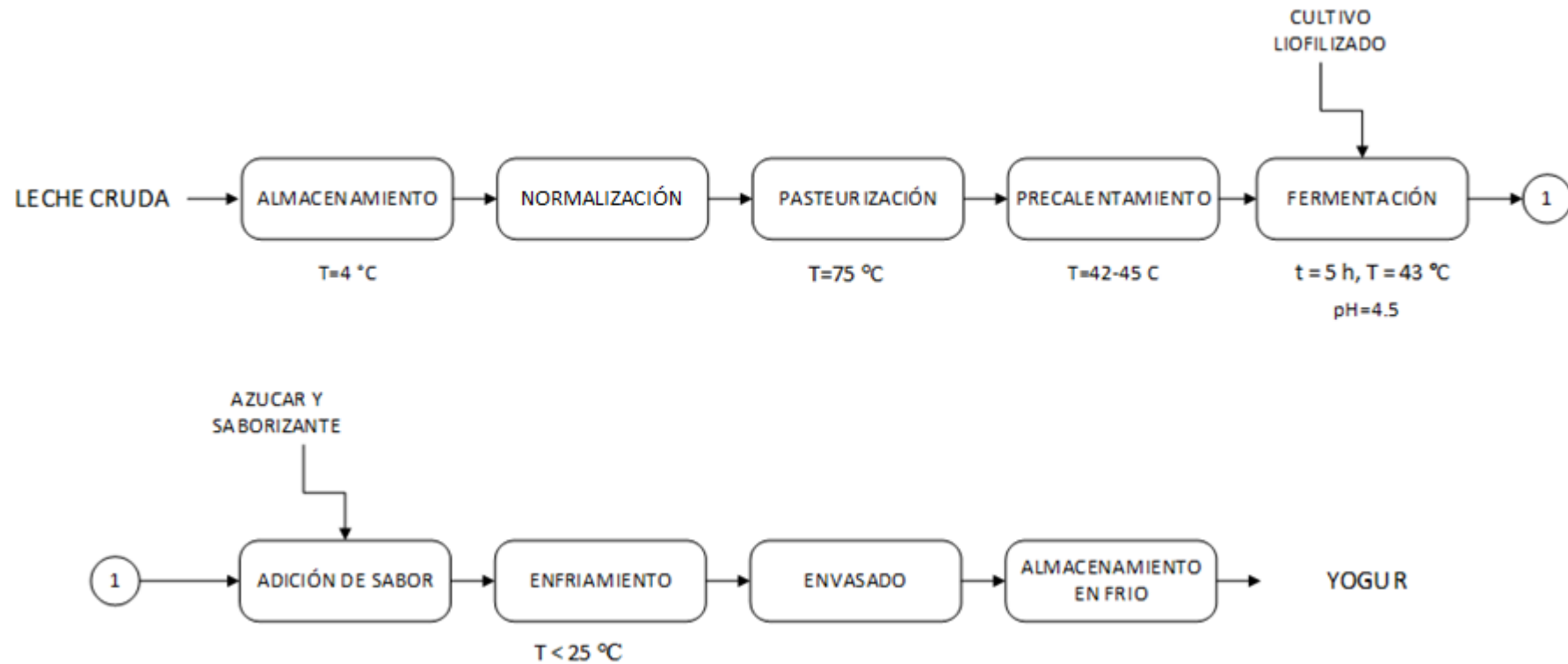


Figura 4. Diagrama de bloques de la planta piloto para producción de yogur

### **1.2.6. Etapas de la producción de yogur.**

**1.2.6.1. Almacenamiento de la leche cruda.** La leche se almacena en grandes depósitos verticales (tanques silo), el recipiente debe tener agitación para evitar la separación de la grasa por gravedad, la agitación debe ser suave para evitar la aireación de la leche y la desintegración de los glóbulos de grasa, entre esta etapa y la siguiente suele existir para grandes industrias un proceso llamado normalización como se indica en la figura 4, el cual no se abordará debido a que no se incluirá esta etapa en la planta piloto.

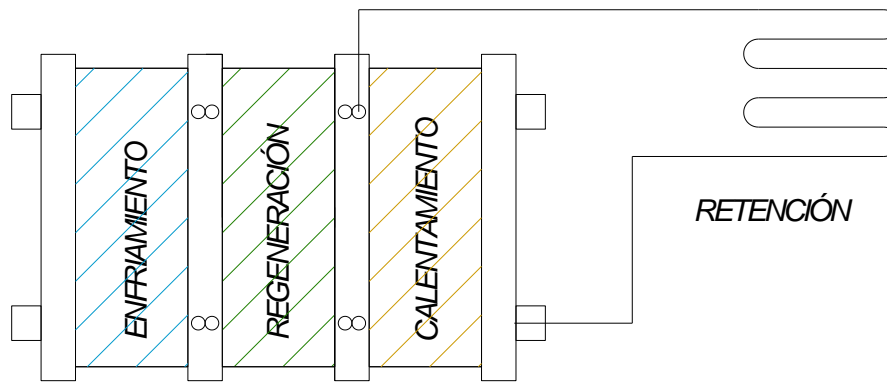
**1.2.6.2. Pasteurización.** Es un tratamiento térmico con el objeto de: esterilizar la leche y mejorar sus propiedades como sustrato para las bacterias de cultivo industrial, asegurar que el coagulo de yogur terminado sea firme y reducir el riesgo de la separación del suero en el producto terminado. El rango de temperatura a la cual se expone la leche esta entre 70 y 90 °C y se la realiza en un recipiente por calentamiento o con intercambiadores de calor si se requiere un proceso continuo.

**1.2.6.2.1. Pasteurización con pasteurizadores de placas.** Cuando la pasteurización se realiza mediante intercambiadores es necesaria la tecnología HTST (High Temperature Short Time) en la cual se lleva la leche hasta una temperatura de 73-80 °C, dependiendo del tiempo de residencia.



**Figura 5. Pasteurizador con intercambiador de calor de placas**

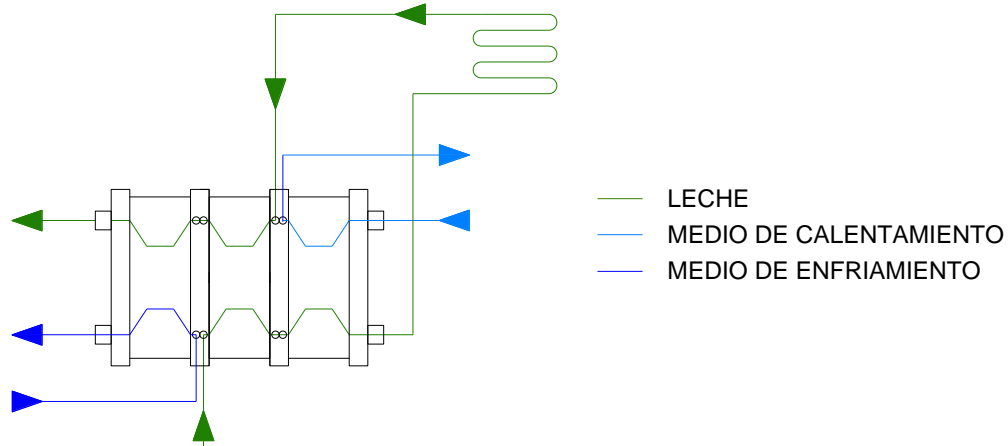
El pasteurizador de placas está conformado por un tanque de balance y 3 zonas de intercambio de calor: calentamiento, regeneración y enfriamiento. Además posterior al calentamiento consta de un tubo de retención para mantener la temperatura por un tiempo llamado tiempo de esterilización (ver figura 5).



**Figura 6. División por zonas en un pasteurizador de placas**

En este tipo de pasteurizador el fluido a ser pasteurizado entra por la zona de regeneración (ver figura 6) y posteriormente pasa a la zona de calentamiento en donde intercambia calor con un fluido de calentamiento que para este caso es agua caliente, luego de esto circula por el tubo de retención cuya longitud depende de la temperatura alcanzada en la zona de calentamiento.

Al salir de la zona de calentamiento el fluido ingresa nuevamente en la zona de regeneración para precalentar el mismo fluido, para finalizar se dirige hacia la zona de enfriamiento para completar la pasteurización en donde intercambia calor con agua fría o helada dependiendo la aplicación que se desea de la leche.



**Figura 7. Trayecto de los fluidos en un pasteurizador**

**1.2.6.2.2. Pasteurización con tanque pasteurizador.** Si la pasteurización se realiza por lotes es necesaria una temperatura de 90 °C durante un tiempo de 5 minutos y se realiza en un tanque

pasteurizador con calentamiento ya sea por resistencia eléctrica o indirectamente con vapor o agua caliente, que cumple la misma función que una olla de cocción sin llegar a la temperatura de ebullición.



**Figura 8. Tanque pasteurizador**

**1.2.6.3. Inoculación.** Se inocula con un cultivo bacteriano conocido también como fermento o starter de los dos microorganismos, el *Streptococcus Thermophilus* y el *Lactobacillus Bulgaricus*, pero que han sido cultivados por separado para evitar un exceso de producción de ácido láctico. De este modo, no se ve favorecida una especie frente a la otra dentro del mismo cultivo.

Si la leche está libre de inhibidores, la actividad microbiana está determinada principalmente por la temperatura de incubación y la cantidad de inóculo agregado. Mientras mayor sea la diferencia con la temperatura óptima y menor la cantidad de inóculo agregada mayor será el tiempo de fermentación.

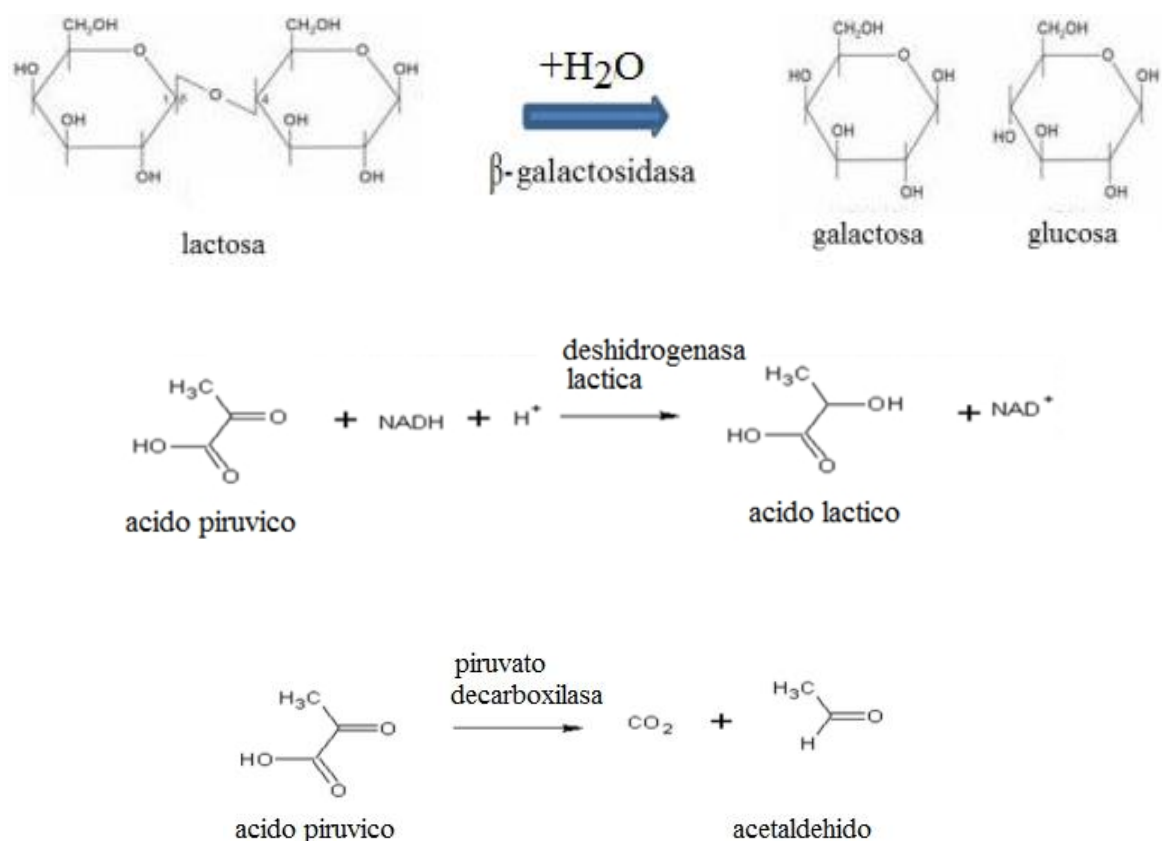
La cantidad recomendada de inóculo va desde 0,5% hasta un 5%. La práctica común en la industria es utilizar 2 al 3% del inóculo con temperatura de incubación entre 42 y 45 °C, el tiempo estará condicionado al aumento de la acidez. [10].

**1.2.6.4. Fermentación láctica.** “El pH (comúnmente de 6,8) es favorable para el *Streptococcus Thermophilus* que se desarrolla más rápido produciendo ácido fórmico y dióxido de carbono, bajando así el pH hasta 5 aproximadamente. De este modo se estimula el crecimiento del *Lactobacillus Bulgaricus*. Al mismo tiempo, el desarrollo del *Lactobacillus Bulgaricus* favorece el crecimiento del *Streptococcus Thermophilus* por la producción de nutrientes como ácido láctico, péptidos y aminoácidos como la valina.

La reacción global del proceso de fermentación láctica es la siguiente:



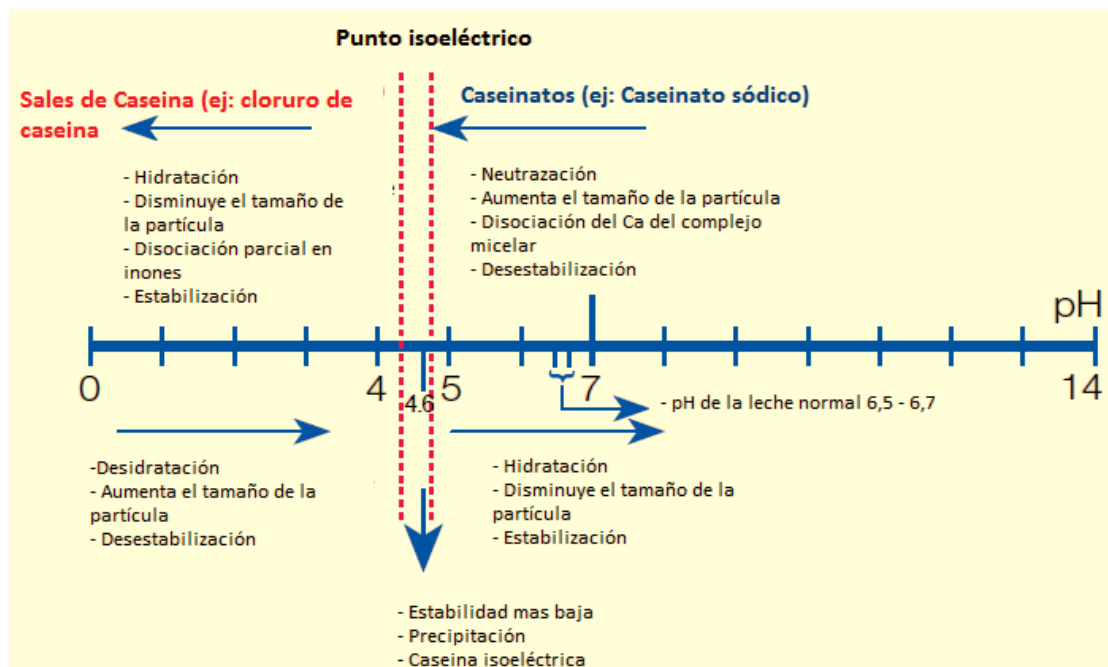
El mecanismo mediante el cual se producen estas reacciones es el siguiente:



**Figura 9. Mecanismo de reacción en la fermentación láctica**

Esta aparición del ácido láctico es el que provoca el descenso del pH, que a su vez es el responsable de la coagulación de la leche. La coagulación se produce a causa de la estabilidad de las caseínas. Al pH de la leche fresca, las caseínas tienen carga negativa y se repelen. En la acidificación de la leche, los iones hidrógeno del ácido son absorbidos por las caseínas, por lo que la carga negativa va disminuyendo y así también la repulsión entre ellas. La coagulación empieza cuando la repulsión ha disminuido. A un pH de 4,6 las caseínas son eléctricamente neutras y completamente insolubles (Ver figura 10). Este nivel de pH se conoce como punto isoelectrico de la caseína. Su efecto en el yogur es que una vez ocurrida le confiere su consistencia semisólida característica”. [11]





**Figura 10. Etapas simplificadas de influencia de un ácido y un álcali sobre la caseína respectivamente**

En los productos lácteos fermentados, la fermentación culmina cuando se alcanza un valor de 4,2 a 4,5 de pH aproximadamente, o cuando se observa un valor de 0,75 a 0,8 de acidez titulable. Una vez lograda la acidez requerida, debe enfriarse a 4 o 5 °C para detener la fermentación y evitar que se siga produciendo ácido láctico.

Estos microorganismos y su efecto del crecimiento conjunto son los responsables finalmente de la formación de aromas y texturas típicos del yogur. Entre los componentes responsables del aroma se encuentran el acetaldehído, acetona, di acetilo como se indica en la figura 9.

La fermentación se realiza en un reactor de tipo batch llamado fermentador o marmita, el proceso se realiza por lotes debido a que requiere un tiempo determinado para realizar la reacción.

**1.2.6.7. Enfriamiento del yogur.** Para detener el crecimiento se debe enfriar hasta los 20- 22 °C mediante un intercambiador de tubo concéntrico ya que la viscosidad aumenta considerablemente y un intercambiador de placas no está diseñado para líquidos muy viscosos.



**Figura 11. Intercambiador de calor de tubo concéntrico para el enfriamiento del yogur**

**1.2.6.5. Adición de sabor.** A esta temperatura eventualmente se adicionan las frutas y el azúcar antes del envasado. El enfriamiento del producto da también una mejor estabilidad porque las proteínas absorben más agua a bajas temperaturas y por el restablecimiento de la estructura de las proteínas. Si se envasa a bajas temperaturas se destruye la estructura de las proteínas y no es posible conformarla otra vez.

**1.2.6.6. Envasado.** La finalidad del envase es la de contener, proteger y conservar los alimentos, además de servir para informar al consumidor. También facilita la venta del producto y su empleo, se comercializa principalmente en envases de vidrio y plástico. Para cerrar los envases de yogur suele utilizarse una hoja de aluminio forrada interiormente con una capa de plástico que evita el contacto del producto ácido con la tapa y permite el cierre sobre el envase por termo sellado.



**Figura 12. Envasadora semiautomática**

**1.2.6.7. Almacenamiento en frío.** Posterior al envasado es necesario disminuir la temperatura hasta 4 °C para inhibir cualquier reacción post acidificación, por lo que se almacena en un cuarto frío con aislamiento térmico de espuma de poliuretano y así mantener las bajas temperaturas.



**Figura 13. Cuarto frío para el enfriamiento y almacenamiento del yogur**

### **1.3. Equipos y ecuaciones de diseño.**

**1.3.1. Equipos de transferencia de calor.** Un equipo de transferencia de calor está diseñado para intercambiar calor entre dos medios, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto. Son parte esencial de los dispositivos de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

La ecuación de diseño de todos los equipos de transferencia de calor es:

$$q = U \times A \times \text{MLDT} \quad (6)$$

En donde:

q: Flujo de calor.

U: Coeficiente total de transferencia de calor.

A: Área del equipo.

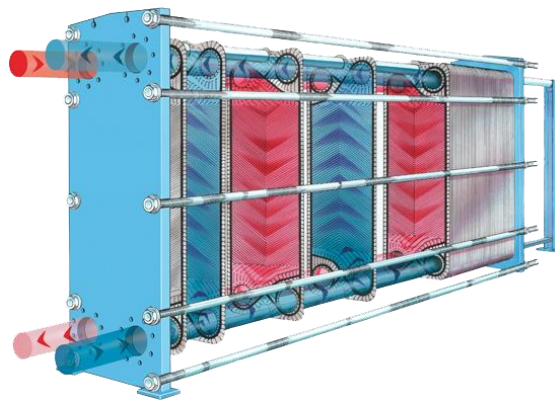
MLDT: Diferencia media de temperaturas.

**1.3.1.1. Intercambiador de calor de placas.** Es un intercambiador con estructura es similar a la de un filtro prensa, es un paquete de placas con empaquetadura alineadas de diferente forma entre dos placas rígidas y barras soportantes que mantienen el paquete hermético. Las placas generalmente tienen una perforación en cada esquina que puede estar abierta o cerrada de acuerdo al flujo que se quiera establecer. El intercambiador de calor de placas consiste en un paquete de placas de metal corrugadas con tomas para el paso de los dos fluidos entre los que se realiza el

intercambio de calor. El conjunto de placas está montado entre una placa bastidor fija y otra de presión desmontable, y se mantiene apretado mediante pernos. Las placas incorporan juntas que sellan la periferia y dirigen los fluidos por canales alternos.

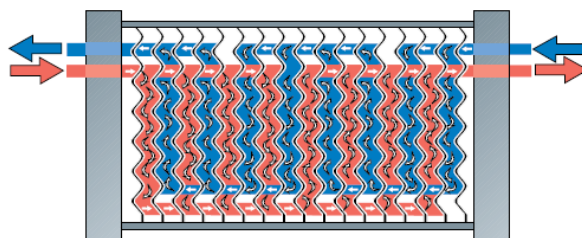
El número de placas depende del caudal, propiedades físicas de los fluidos, pérdida de carga y programa de temperaturas. La corrugación de las placas favorece la turbulencia del fluido y contribuye a que las placas resistan la presión diferencial.

Las placas de intercambio térmico y placa de presión están suspendidas en una barra guía superior y se apoyan en una barra guía inferior. Ambas barras están fijadas a una columna de soporte. Las conexiones están siempre situadas en la placa fija del bastidor a menos que uno o ambos fluidos requieran más de un paso, en cuyo caso también se sitúan en la placa de presión movable.



**Figura 14. Intercambiador de calor de placas**

Entre las placas del intercambiador de calor se forman canales y los orificios de las esquinas están dispuestos de manera que los dos líquidos circulen por canales alternos. El calor se transfiere por la placa entre los canales. Para incrementar la eficiencia al máximo se genera un flujo en contracorriente. La corrugación de las placas provoca un flujo en torbellino que aumenta la eficiencia de intercambio térmico y protege la placa contra la presión diferencial. [12]



**Figura 15. Flujo en un intercambiador de calor de placas**

La ecuación de diseño de estos equipos es:

$$Q = N \times U_o \times A_o \times \text{MLDT} \quad (7)$$

En donde:

Q: Flujo de calor.

N: Número de placas

U<sub>o</sub>: Coeficiente total de transferencia de calor.

A<sub>o</sub>: Superficie de transferencia de calor de una placa, tal que 2A<sub>o</sub> es el área existente en un canal formado por dos placas.

MLDT: Diferencia media de temperatura.

El algoritmo de cálculo para un intercambiador de placas es el siguiente [13]:

***a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.***

$$\text{MLDT} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (8)$$

En donde:

ΔT<sub>1</sub>: Diferencia de temperaturas en extremo caliente.

ΔT<sub>2</sub>: Diferencia de temperaturas en extremo frío.

***b. Cálculo de la temperatura media.***

$$T_m = \frac{T_i + T_f}{2} \quad (9)$$

$$t_m = \frac{t_i + t_f}{2} \quad (10)$$

En donde:

T<sub>m</sub>: Temperatura media del fluido.

t<sub>m</sub>: Temperatura media del servicio.

***c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.***

Se parte de los análisis del laboratorio realizados a la materia prima, así como de ecuaciones empíricas.

**d. Balance de energía.**

Se determina la energía necesaria para elevar la temperatura del agua desde  $T_i$  (inicial) hasta  $T_f$  (final).

$$q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (11)$$

**e. Cálculo del área total.**

Es necesario asumir un valor del coeficiente total de transmisión de calor al que se llama  $U_A$ .

$$A_T = \frac{q}{U_A \text{MLDT}} \quad (12)$$

En donde:

$A_T$ : Área total de transferencia.

$U_A$ : Coeficiente total de transmisión de calor asumido.

**f. Cálculo del número de placas.**

$$N_P = \frac{A_T}{A_P} \quad (13)$$

En donde:

$A_P$ : Área de transferencia de la placa.

$N_P$ : Número de placas.

El número de platos debe ser un número impar y de ser necesario se realiza una aproximación al impar superior.

**g. Cálculo del número de canales.**

$$N_C = \frac{N_P - 1}{2} \quad (14)$$

En donde:

$N_C$ : Número de canales.

***h. Cálculo del área de flujo total.***

$$A_f = WE_P N_C \quad (15)$$

En donde:

W: Ancho de la placa.

E<sub>P</sub>: Separación de las placas.

A<sub>f</sub>: Área de flujo.

***i. Cálculo del diámetro equivalente.***

$$D_e = 2 \times b \quad (16)$$

En donde:

D<sub>e</sub>: Diámetro equivalente o hidráulico.

b: Profundidad de la placa.

***j. Cálculo del flujo másico por unidad de área.***

$$G = \frac{\dot{m}}{A_f} \quad (17)$$

En donde:

G: Flujo másico por unidad de área.

***k. Determinación de los coeficientes de transmisión de calor.***

Se utilizan las correlaciones de Thonon, que corresponde también al mismo esquema de la correlación de Dittus Boelter, modificada por la geometría del intercambiador. En la tabla 4 se encuentra tabulado el valor numérico de los parámetros descritos en la ecuación (18) para diferentes ángulos de corrugación y rangos del número de Reynolds.

$$Nu = C_1 \times Re^m \times Pr^{1/3} \quad (18)$$

En donde:

Nu: Número de Nusselt.

Re: Número de Reynolds.

Pr: Número de Prandlt.

$C_1$ : Parámetro de las correlaciones de Thonon.

m: Parámetro de las correlaciones de Thonon.

**Tabla 4. Correlaciones de Thonon**

$\beta$	$Re$	$C_1$	$m$	$Re$	$C_2$	$P$
75	$50 \leq Re \leq 15000$	0.1000	0.687	$\leq 1000$	28.21	0.900
				$> 1000$	0.872	0.392
60	$50 \leq Re \leq 15000$	0.2267	0.631	$\leq 550$	26.34	0.830
				$> 550$	0.572	0.217
45	$50 \leq Re \leq 15000$	0.2998	0.645	$\leq 200$	18.19	0.682
				$> 200$	0.6857	0.172
30	$50 \leq Re \leq 15000$	0.2946	0.700	$\leq 160$	45.57	0.670
				$> 160$	0.370	0.172

**Fuente:** TABOAS Francisco, Estudio del proceso de ebullición agua-amoniaco en un intercambiador de placas para equipo de refrigeración por absorción, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, España, 2006. p. 13.

$$Re = \frac{G \times D_e}{\mu} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{k} \quad (20)$$

$$h = \frac{Nu \times K}{D_e} \quad (21)$$

En donde:

h: Coeficiente individual de transmisión de calor por convección.

#### 1. Determinación del coeficiente total de transferencia de calor.

Para el sistema agua-leche en un intercambiador de placas se ha considerado un factor ensuciamiento de  $8 \times 10^{-5}$  en un tiempo de 14000 s, valor determinado en el trabajo de Lalande y Corrieu (1980) y que se aplicará en el presente trabajo.

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_L} + \frac{1}{h_W} + \frac{e_p}{k_{acero}} + R_d \quad (22)$$

En donde:

$e_p$ : Espesor de la placa



Rd: Coeficiente de ensuciamiento.

U<sub>C</sub>: Coeficiente total de transferencia de calor calculado.

Si el coeficiente total calculado es igual al coeficiente asumido entonces se continua con el cálculo, si se obtiene un valor diferente se reemplaza este nuevo valor como asumido y se realiza el cálculo nuevamente hasta que sean iguales.

***m. Cálculo del número de unidades de transferencia y efectividad.***

$$NTU = \frac{U_C A_T}{(mC_P)_{\min}} \quad (23)$$

$$c = \frac{(mC_P)_{\max}}{(mC_P)_{\min}} \quad (24)$$

En donde:

c: Parámetro que relaciona el calor específico de cada fluido.

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-NTU(1-c)]}}{1 - c \times e^{[-NTU(1-c)]}} \quad (25)$$

En donde:

ε: Eficiencia.

***n. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.***

$$f = C_2 \times Re^{-P} \quad (26)$$

En donde:

f: Factor de fricción de fanning.

C<sub>2</sub>: Parámetro de las correlaciones de Thonon.

P: Parámetro de las correlaciones de Thonon.

$$\Delta P = \frac{f \times 2 \times L \times G^2}{\rho \times D_e} \quad (27)$$

$$L = \frac{A_T}{W} \quad (28)$$

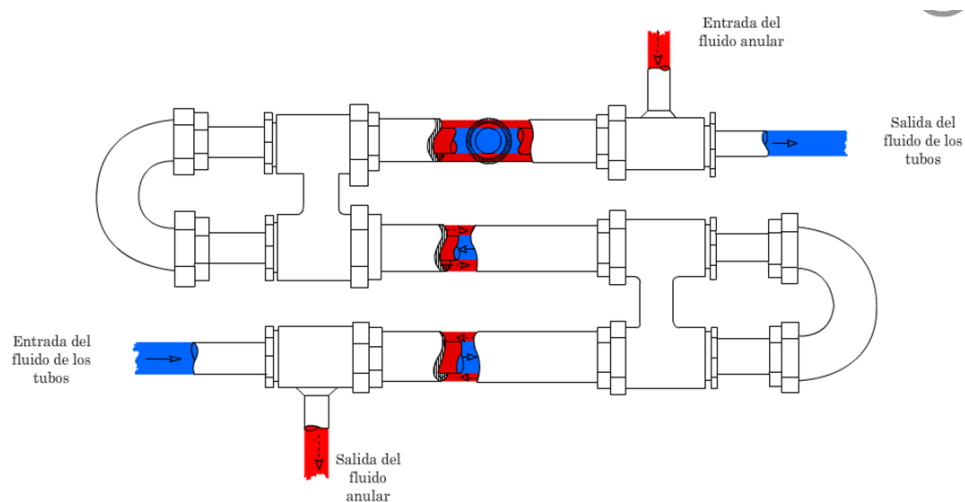
En donde:

L: Longitud efectiva.

**1.5.1.2. Intercambiador de calor de tubo concéntrico.** Este tipo de intercambiador de calor puede estar formado por uno o más tubos pequeños contenidos en un tubo de diámetro más grande. Al tubo externo se le llama ánulo. [14]

Se puede utilizar tanto para calentamiento como enfriamiento, pero no son recomendables para condensación o vaporización.

Las desventajas de estos intercambiadores de calor es la pequeña superficie de transferencia de calor contenida en una horquilla simple, cuando se necesita mayor superficie, se requiere un gran número de ellas. Esto requiere considerable espacio. Los gastos para el mantenimiento son muy altos, sin embargo para fluidos viscosos resulta útil ya que un intercambiador de placas dificulta el movimiento del fluido.



**Figura 16. Esquema de un intercambiador de calor de flujo concéntrico**

El procedimiento de cálculo es el siguiente [15]:

**a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.**

Ver ecuación (8)

**b. Cálculo de la temperatura media y de pared.**

Ver ecuaciones (9) y (10)

Si el fluido de calentamiento cambia de fase (vapor de agua) se utiliza la siguiente ecuación para estimar el valor de la temperatura a la cual se evalúan las propiedades fisicoquímicas del vapor.

$$t' = T_{sat} - \frac{3}{8}(MLDT) \quad (29)$$

**c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.**

Se recopilan datos fisicoquímicos evaluados a la temperatura media de cada fluido y a  $t'$  en caso del vapor.

**d. Balance de energía.**

Ver ecuación (11).

**e. Área de flujo y diámetro equivalente.**

$$A_I = \pi \times \frac{d_i^2}{4} \quad (30)$$

$$A_A = \pi \times \frac{D_i^2 - d_e^2}{4} \quad (31)$$

$$D_e = \frac{D_i^2 - d_e^2}{d_i} \quad (32)$$

En donde:

$A_I$ : Área de flujo del tubo pequeño.

$A_A$ : Área de flujo del ánulo (tubo grande).

$D_e$ : Diámetro equivalente. (Usado en todas las operaciones realizadas para el ánulo)

$d_i$ : Diámetro interno del tubo pequeño.

$d_e$ : Diámetro externo del tubo pequeño.

$D_i$ : Diámetro interno del tubo grande.

**f. Cálculo del flujo másico por unidad de área**

Ver ecuación (17).

**g. Determinación de los coeficientes de transmisión de calor.**

Para cálculo del número de Reynolds, Prandlt y el coeficiente individual de transferencia de calor ver ecuaciones (19), (20) y (21), usando diámetro equivalente en el ánulo y diámetro interno en el tubo interior.

En el tubo interior

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^x \quad (33)$$

$x = 0,3$  Para calentamiento.

$x = 0,4$  Para enfriamiento.

En donde:

Nu: Número de Nusselt.

En espacios anulares se usa la ecuación de Wiegand:

$$Nu = 0,023Re^{2/3} Pr^{0,14} \left( \frac{Di}{di} \right)^{0,45} \quad (34)$$

Cuando el fluido cambia de fase se usa la ecuación:

$$h = 0,725 \left[ \frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \left[ \lambda + \frac{3}{8} (Ts - t') \right]}{De(Ts - t') \mu} \right] \quad (35)$$

En donde:

h: Coeficiente individual de convección con cambio de fase.

Es necesario hacer una corrección para el coeficiente de película en el ánulo:

$$h_{io} = h_i \frac{di}{de} \quad (36)$$

#### ***h. Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor***

$$\frac{1}{U_C} = \frac{h_o \times h_{io}}{h_o + h_{io}} \quad (37)$$

En donde:

$h_{io}$ : Coeficiente individual de convección interno corregido.

$h_o$ : Coeficiente individual de convección externo.

$U_C$ : Coeficiente global de transferencia de calor limpio.

Es necesario implementar el factor de obstrucción debido a que los fluidos con los que se va a trabajar tienden a formar capas espesas en las tuberías por las cuales circulan, en este caso se ha asumido un factor de obstrucción de  $8 \times 10^{-5}$  para la leche y se asumirá el mismo para el yogur.

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_d \quad (38)$$

En donde:

$R_d$ : Factor de obstrucción

$U_D$ : Coeficiente global de transferencia de calor real.

***i. Cálculo del área del equipo.***

Ver ecuación (12)

***j. Cálculo del número de tubos y horquillas.***

$$N_t = \frac{A_T}{A_t L} \quad (39)$$

$$N_h = \frac{N_t}{2} \quad (40)$$

En donde:

$N_t$ : Área de transferencia de calor por tubo.

$A_t$ : Área de transferencia de calor por tubo.

$L$ : Longitud efectiva de cada tubo.

***k. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.***

Las pérdidas de carga en ese equipo se producen por 2 razones: pérdidas por fricción y pérdidas por giros las cuales se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P_T = \Delta P_f + \Delta P_g \quad (41)$$

$$\Delta P_f = 4N_h f \rho v^2 \frac{L}{De} \quad (42)$$

$$\Delta P_g = 2(2N_h - 1)\rho v^2 \quad (43)$$

En donde:

$f$ : Factor de fricción.

El factor de fricción se calcula de acuerdo al régimen de flujo.

- Para régimen laminar:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (44)$$

- Para régimen turbulento:

$$f = 0,035 + \frac{0,264}{Re^{0,42}} \quad (45)$$

**1.3.2. Tanques y recipientes.** Los tanques en la industria láctea se utilizan en gran cantidad de operaciones y sus tamaños varían de acuerdo a la necesidad, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Tanques de almacenamiento
- Tanques de proceso.

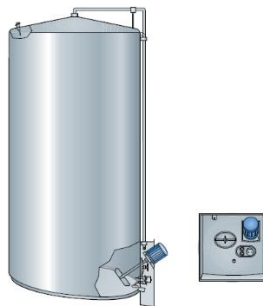
En general la relación de diseño para un tanque de almacenamiento u operación de líquidos es:

$$D = \frac{2}{3} H \quad (46)$$

Relación que será usada en los tanques del proceso de producción de yogur.

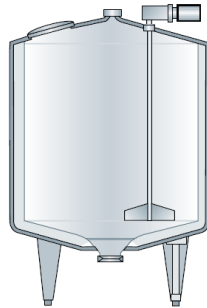
#### 1.3.2.1. Tanques de almacenamiento.

**1.3.2.1.1. Tanques silo.** Estos tanques son usados para la recogida y recepción de la leche, la superficie de contacto es de acero inoxidable. Con el objetivo de drenar fácilmente el fluido, estos tanques tienen una inclinación del 6% en el fondo. Este tanque se encuentra provisto un sistema de agitación y sistemas de monitoreo y control [16].



**Figura 17. Tanque silo**

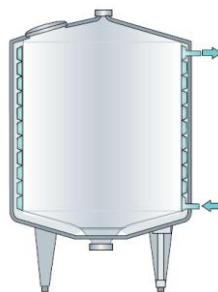
**1.3.2.1.2. Depósitos intermedios de almacenamiento.** Se utilizan para almacenar un producto durante un periodo corto de tiempo antes de que continúe la línea de proceso. Son también usados como depósitos pulmón o reguladores para absorber las variaciones de caudal del producto en el proceso. Después del tratamiento térmico la leche se bombea hacia un depósito de regulación, y desde ahí al llenado. Si el proceso es interrumpido la leche se almacena en dicho depósito hasta reanudar la operación. [17]



**Figura 18. Tanque de almacenamiento**

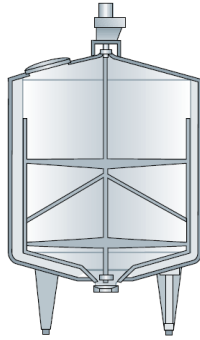
El depósito se encuentra provisto de un agitador y también puede equiparse con sistemas de limpieza y control de nivel y temperatura. Para la capacidad del tanque pulmón se puede decir que corresponde con 1.5 hora de la capacidad normal de producción.

**1.3.2.1.3. Depósitos de mezcla.** Son utilizados para diferentes productos, se encuentran aislados térmicamente y provistos de un sistema de calentamiento en forma de tubos soldados, por su interior circula el medio de calentamiento. La agitación se diseña de acuerdo a la aplicación específica.



**Figura 19. Depósito de mezcla**

**1.3.2.2. Tanques de proceso.** En estos depósitos los productos son tratados para cambiar sus características, y son diseñados específicamente para cada proceso, en la elaboración del yogur se requiere de fermentadores para la producción de ácido láctico. [18]



**Figura 20. Tanque de proceso**

### **1.3.3. Agitadores.**

**1.3.3.1. Agitación.** Se refiere al movimiento inducido de un líquido en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor con diferentes finalidades, como son [19]:

- Suspensión de partículas sólidas.
- Mezclado de líquidos miscibles, por ejemplo, alcohol metílico y agua.
- Dispersión de un gas en un líquido en forma de pequeñas burbujas.
- Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas diminutas.
- Promoción de la transformación de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

Para estudios técnicos se considera el número de Reynolds para agitación de la siguiente manera [20]:

- **Régimen laminar:** bajo régimen laminar el efecto de la densidad del fluido es suprimido por el efecto de la viscosidad, por lo tanto para el cálculo de la potencia solo influye la viscosidad.

$Re \leq 10$ , para agitadores pequeños.

$Re \leq 100$ , para agitadores grandes como el agitador helicoidal o el agitador de ancla, con espacio reducido entre el agitador y la pared del tanque.

- **Régimen de transición:** bajo régimen de transición la viscosidad y densidad del fluido tienen efecto en la potencia del agitador.

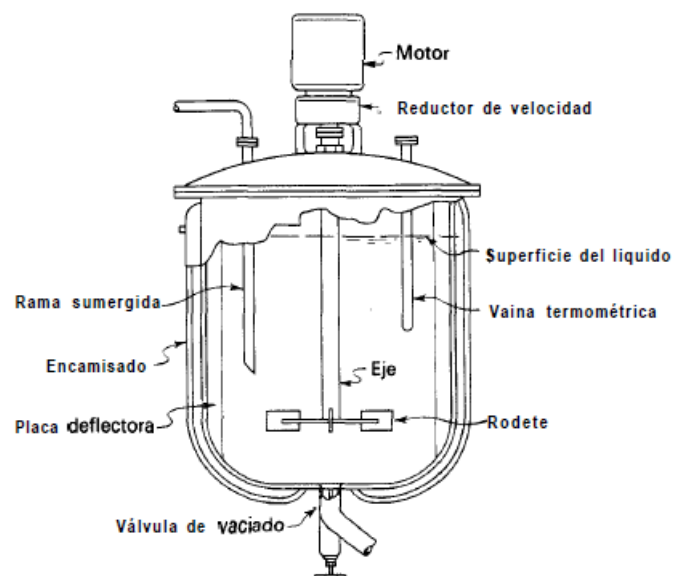
$$10 \leq Re \leq 5 \times 10^4$$



- **Régimen turbulento:** bajo régimen turbulento las fuerzas de viscosidad pierden efecto y solo se considera la densidad del fluido en el cálculo de la potencia.

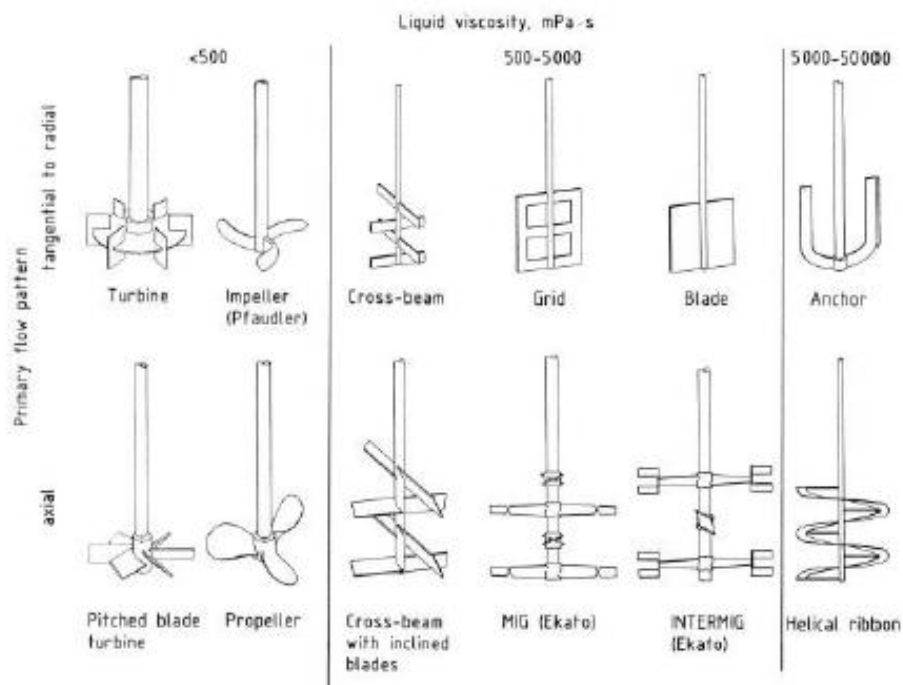
$$Re \geq 5 \times 10^4$$

“El equipo de agitación consta de un tanque con fondo circular o plano y provisto de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. El agitador va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior. El eje está accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora de velocidad. El agitador crea un modelo de flujo en el sistema, dando lugar a que el líquido circule a través del tanque y eventualmente retorne al agitador”. [21]



**Figura 21. Partes del equipo de un tanque agitado**

**1.3.3.2. Tipos de agitadores.** Existen diferentes tipos de agitadores de acuerdo la viscosidad del fluido que será agitado como se indica en la figura (22) y la aplicación deseada ya sea agitación, mezclado o incremento de la transmisión de calor.



**Figura 22. Partes del equipo de un tanque agitado**

**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capítulo de agitación, p.4, Figura 3.

**1.3.3.3. Procedimiento de cálculo.** Para realizar el cálculo del agitador se requieren propiedades físicoquímicas como: viscosidad, densidad, además de la velocidad del agitador y las dimensiones del tanque.

El procedimiento de cálculo es el siguiente [22]:

**a. Dimensionamiento del agitador.**

Se realiza el cálculo de las dimensiones del agitador de acuerdo a las relaciones de diseño de la figura (23), con ellas se obtiene el diámetro del agitador.

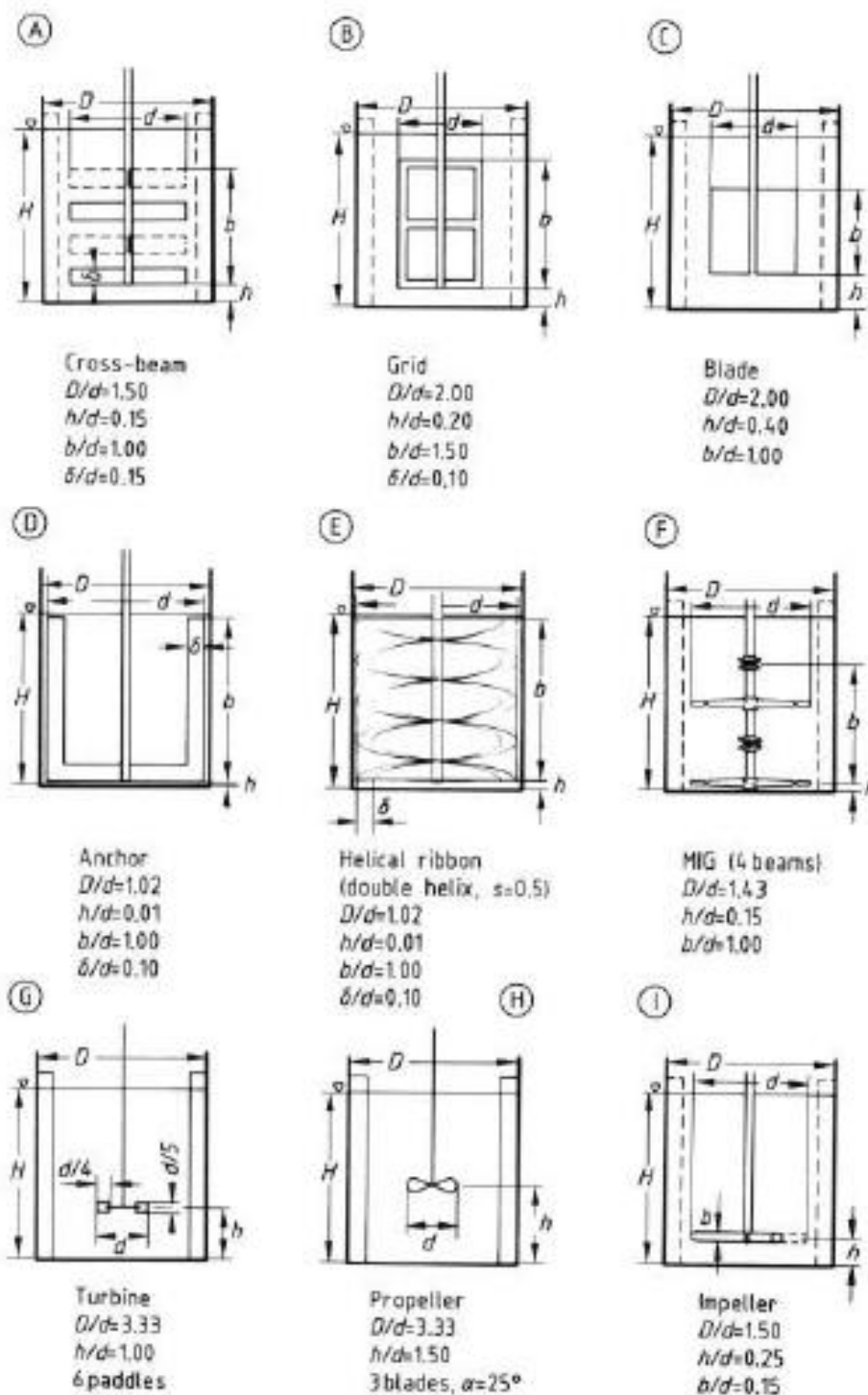
**b. Cálculo del número de Reynolds para agitación.**

$$Re = \frac{nd_A^2\rho}{\mu} \quad (47)$$

En donde:

$n$ : Velocidad en revoluciones por segundo.

$d_A$ : Diámetro del agitador.



**Figura 23. Dimensiones y condiciones de instalación para diferentes tipos de agitadores**

**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capítulo de agitación, p.9, Figura 8.

### *c. Cálculo de la potencia.*

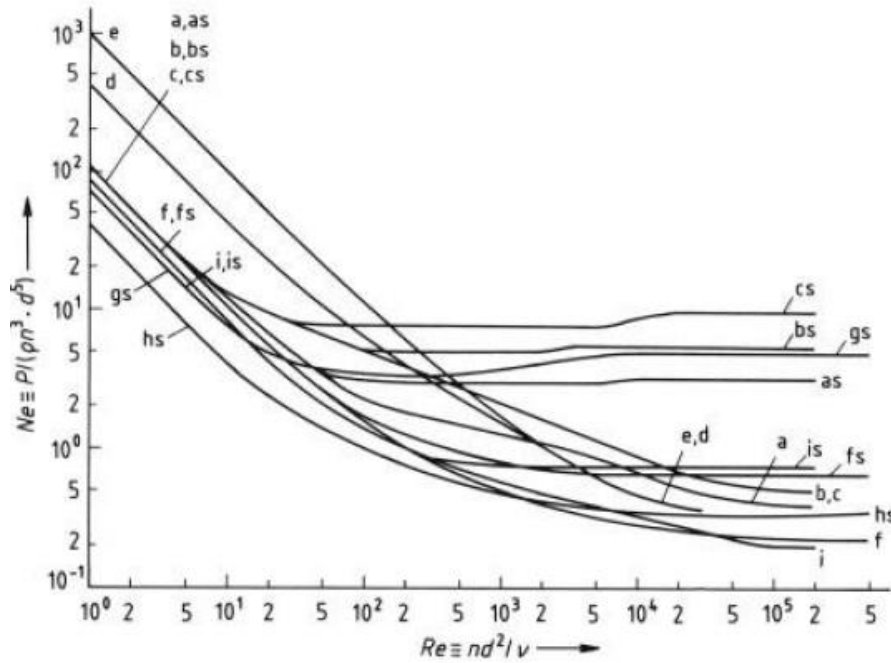
Se obtiene el número de potencia con la gráfica que relaciona el número de potencia con el número de Reynolds (ver figura 24), posteriormente se aplica la ecuación (46)

$$P = N_P n^3 d_A^5 \rho \quad (48)$$

En donde:

$P$ : Potencia en unidades SI.

$N_P$ : Número de potencia.



**Figura 24. Carta del número de potencia para agitadores**

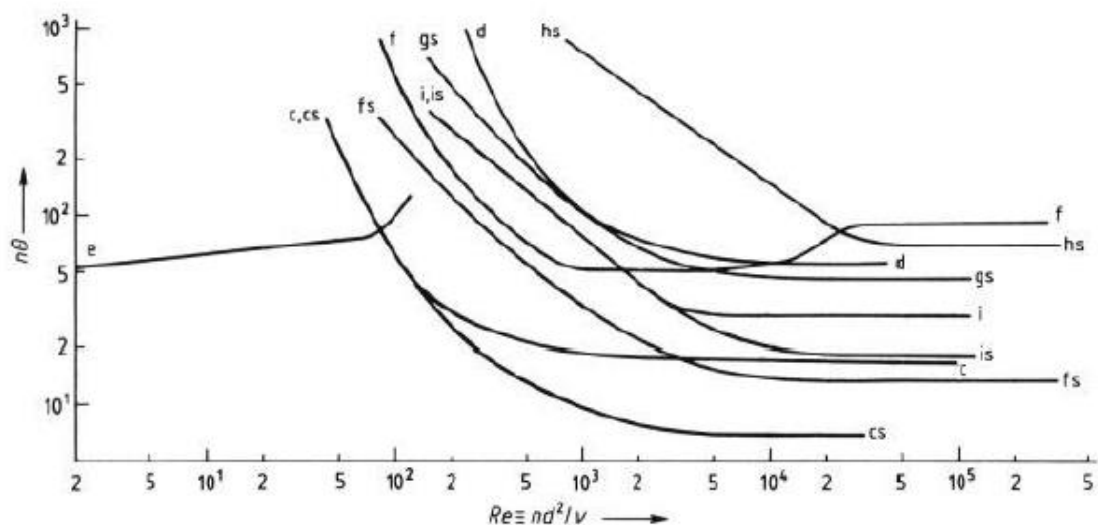
**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMESTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capítulo de agitación, p.9, Figura 9.

En donde:

- a. Agitador de hojas cruzadas.
- b. Agitador de red o cuadrícula.
- c. Agitador de paletas.
- d. Agitador de ancla.
- e. Agitador de cinta helicoidal.
- f. Agitador MIG.
- g. Agitador de turbina.
- h. Agitador de hélice.
- i. Agitador de impulsor.

**NOTA:** La letra s que acompaña a la letra correspondiente al agitador en las figuras (24) y (25) indica la presencia de deflectores en el tanque agitado.

Si se requiere calcular el tiempo de mezcla o de agitación se obtiene el valor  $n\theta$  con la carta que correlaciona el número de Reynolds con el producto entre el tiempo de mezcla y la velocidad del agitador (ver figura 25).



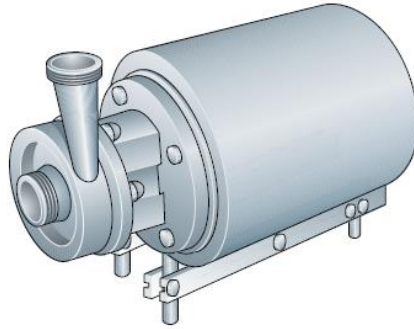
**Figura 25. Carta del tiempo de mezcla para agitadores**

**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMESTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capitulo de agitación, p.10, Figura 9.

#### 1.3.4. Bombas.

**1.3.4.1. Bomba Centrífuga.** Debido a las pérdidas de carga provocadas por las redes de tuberías, las válvulas y equipos como los intercambiadores de calor, es necesario el uso de bombas en diferentes partes del proceso.

Las bombas para el uso en una planta de lácteos son las centrífugas, las de anillo líquido y las de desplazamiento positivo. La bomba centrífuga es la más utilizada para productos de baja viscosidad pero no pueden manejar líquidos aireados.



**Figura 26. Bomba centrífuga**

Algunos conceptos importantes para el cálculo y especificación de bombas centrífugas son:

- **Línea de aspiración:** Representa la presión a la entrada de la bomba. Es la suma algebraica de la altura estática de succión ( $Z_s$  de la figura 27), presión existente sobre el líquido y pérdidas de carga por rozamiento de la tubería de aspiración. Los dos primeros sumandos pueden ser positivos o negativos, pero el tercero es siempre negativo como se observa en la ecuación (49).

$$h_s = Z_s + \frac{P_s}{\rho g} - h_{fs} \quad (49)$$

En donde:

$h_s$ : Altura dinámica de succión

$Z_s$ : Altura estática de succión.

$P_s$ : Presión en el recipiente de la succión.

$h_{fs}$ : Pérdidas por fricción en la succión.

- **Línea de impulsión:** Es la suma algebraica de la altura estática de descarga ( $Z_d$  de la figura 27), pérdida de carga en la impulsión y presión sobre el líquido en el punto de recepción como se indica en la ecuación (50).

$$h_d = Z_d + \frac{P_d}{\rho g} + h_{fd} \quad (50)$$

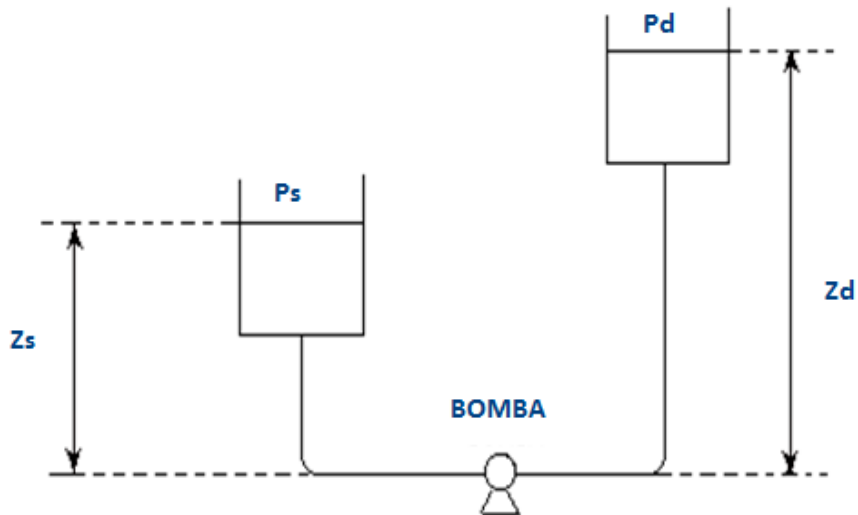
En donde:

$h_d$ : Altura dinámica de descarga.

$Z_d$ : Altura estática de descarga.

$P_d$ : Presión en el recipiente de la descarga.

$h_{fd}$ : Pérdidas por fricción en la descarga.



**Figura 27. Esquema de alturas estáticas de una bomba**

La diferencia entre las alturas totales de impulsión y de aspiración es la carga de la bomba ( $\Delta h$ ), es decir, la energía que ha de ser conferida al fluido como se indica en la ecuación (51).

$$\Delta h = (Z_d - Z_s) + \frac{P_d - P_s}{\rho g} + (h_{fd} + h_{fs}) \quad (51)$$

En donde:

$\Delta h$ : Carga de la bomba.

- **Potencia de la bomba:** Debido a que la especificación de la bomba se debe realizar en unidades de presión y no de altura se debe transformar la carga de la bomba a potencia, esta será la potencia teórica de la misma.

$$P = \Delta h \times Q \times \rho \times g \quad (52)$$

En donde:

Q: Caudal del fluido.

g: gravedad [9,8 m<sup>2</sup>/s].

- **Carga neta positiva de aspiración:** Se representa por las siglas CNPA y es necesario diferenciar entre dos conceptos: El CNPA requerida (CNPA<sub>R</sub>) y la CNPA disponible (CNPA<sub>D</sub>). La primera depende del diseño de la bomba y representa la energía necesaria para llenar la parte de aspiración de la misma y vencer las pérdidas por rozamientos y aumento de velocidad desde la conexión de aspiración hasta el punto donde se incrementa la energía. Es,

por tanto, un valor que depende del diseño constructivo de la bomba y que debe suministrar el fabricante de la misma [23].

El CNPA disponible es la diferencia entre la presión a la entrada de la bomba y la tensión de vapor del fluido a la temperatura de funcionamiento, medidas ambas en metros de columna de líquido.

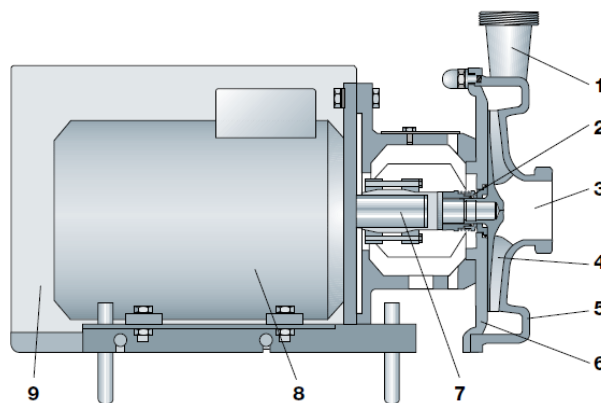
$$\text{CNPA}_D = Z_s + \frac{P_d - P_v}{\rho g} - h_{fs} \quad (53)$$

En donde:

CNPA<sub>D</sub>: Carga neta positiva de aspiración disponible.

P<sub>v</sub>: Presión de vapor del fluido.

Lógicamente siempre deberá cumplirse que la CNPA<sub>D</sub> sea mayor o igual que la CNPA<sub>R</sub>. Por otro lado la CNPA<sub>D</sub> siempre habrá de ser positiva y lo mayor posible, ya que de este modo se evitará que la presión a la entrada de la bomba descienda por debajo de la presión de vapor del fluido en las condiciones de temperatura existentes en dicho punto, lo que provocaría la aparición de burbujas de vapor, con el consiguiente peligro de que la bomba entre en cavitación.

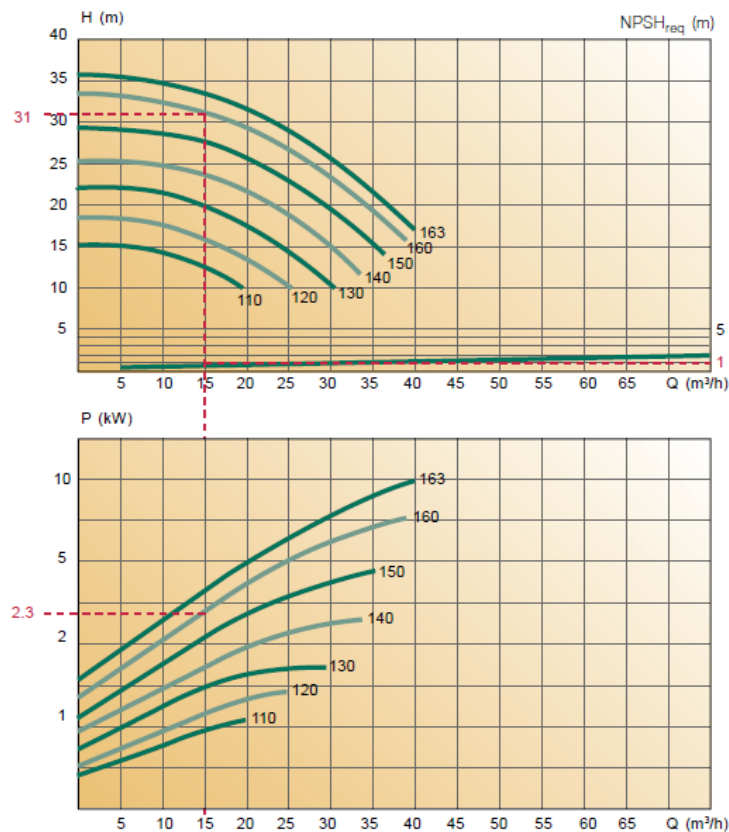


**Figura 28. Partes de una bomba centrífuga**

1. Línea de impulsión.
2. Cierre axial.
3. Línea de aspiración.
4. Rodete.
5. Carcasa de la bomba.
6. Placa soporte.
7. Eje motor.
8. Motor.
9. Cubierta de acero inoxidable.



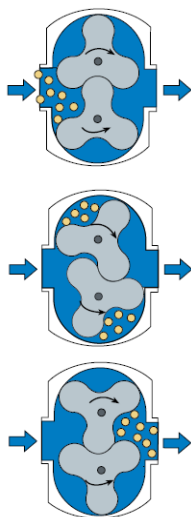
- **Curvas características.** Las curvas características de las bombas centrífugas no ayudan a seleccionar la bomba adecuada, se necesitan tres curvas:
  - Caudal y carga, son las curvas QH.
  - Potencia del motor necesario, kW.
  - NPSH, Carga neta positiva de succión o aspiración.



**Figura 29. Curvas características en bombas centrífugas**

Estas curvas son construidas en base a pruebas realizadas con agua, se debe recalculer el momento de trabajar con otro líquido.

**1.3.4.2. Bombas de desplazamiento positivo:** Las bombas de este tipo son bombas de desplazamiento que crean la succión y la descarga, desplazando el fluido con un elemento móvil. El espacio que ocupa el fluido se llena y vacía alternativamente forzando y extrayendo el líquido mediante movimiento mecánico (ver figura 30).

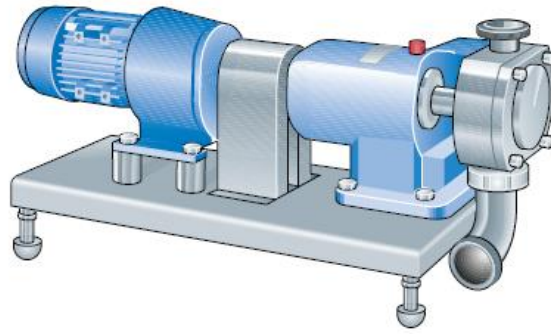


**Figura 30. Funcionamiento de una bomba de desplazamiento positivo (bomba de rotor lobulado)**

El término “positivo”, significa que la presión desarrollada está limitada solamente por la resistencia estructural de las distintas partes de la bomba y la descarga no es afectada por la carga a presión sino que está determinada por la velocidad de la bomba y la medida del volumen desplazado.

Las bombas de desplazamiento positivo funcionan con bajas capacidades y altas presiones en relación con su tamaño y costo. Este tipo de bomba resulta el más útil para presiones extremadamente altas, para operación manual, para descargas relativamente bajas, para operación a baja velocidad, para succiones variables y para pozos profundos cuando la capacidad de bombeo requerida es muy poca.

**1.3.4.2.1. Bomba de rotor lobulado.** Los lóbulos son accionados independientemente por medio de un sistema de engranajes externo a la cámara de bombeo. Ofrecen un mayor desplazamiento, pero su costo es mayor a las bombas de otro tipo. Esta bomba es adecuada para utilizarla con fluidos más sensibles al efecto del esfuerzo tangencial (o de cizalle). Es excelente para el manejo de fluidos con gases o partículas atrapadas [24].



**Figura 31. Bomba de rotor lobulado**

**1.3.5. Tuberías.** La leche y los productos lácteos fluyen a través de tuberías, también existen diferentes líneas para:

- Agua.
- Vapor.
- Refrigerante.
- Soluciones de limpieza.
- Aire comprimido.

**1.3.5.1. Regímenes de flujo en tuberías.** Cuando los fluidos se mueven por un canal cerrado de cualquier área de corte transversal, se puede presentar cualquiera de los tres tipos diferentes de flujo, dependiendo de las condiciones existentes. Cuando la velocidad del flujo es baja, su desplazamiento es uniforme y terso. Sin embargo, cuando la velocidad es bastante alta, se observa una corriente inestable en la que se forman remolinos o pequeños paquetes de partículas de fluido que se mueve en todas direcciones y con gran diversidad de ángulos con respecto a la dirección normal del flujo. [25]

Existen tres tipos de regímenes de flujo en tuberías:

- Laminar.
- Transición.
- Turbulento.

**1.3.5.2. Velocidad media de flujo:** El término “velocidad”, a menos que se diga lo contrario, se refiere a la velocidad media o promedio de cierta sección transversal dada por la ecuación de continuidad para un flujo estacionario:

$$v = \frac{\varphi}{A} \quad (54)$$

**1.3.5.3. Número de Reynolds:** Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad. [26]

El número de Reynolds es:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (55)$$

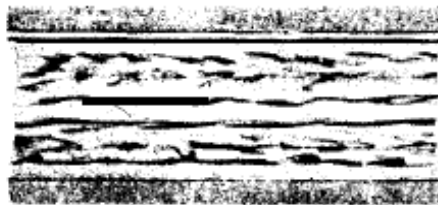
Para estudios técnicos se considera el número de Reynolds de la siguiente manera:

- Flujo Laminar, menor que 2000.



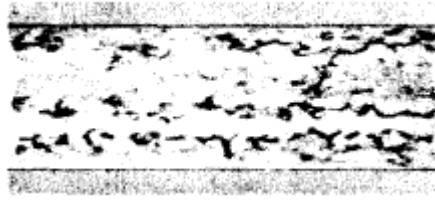
**Figura 32. Fotografía del flujo laminar en una tubería**

- Flujo de transición, entre 2000 y 4000.



**Figura 33. Fotografía del flujo de transición en una tubería**

- Flujo turbulento, mayor que 4000.



**Figura 34. Fotografía del flujo turbulento en una tubería.**

**1.3.5.4. Pérdidas por fricción en tuberías.** El flujo de los fluidos en tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí y, consecuentemente, por la pérdida de energía disponible; en otras palabras, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción se utiliza la ecuación de Darcy – Weisbach:

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (56)$$

**1.3.5.4.1. Factor de fricción ( $f$ ).** La fórmula de Darcy puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción  $f$ , que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ( $Re, < 2000$ ) es función sólo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ( $Re, > 4000$ ) es también función del tipo de pared de la tubería y se puede obtener del diagrama de Moody. [27]

## 2. MARCO EXPERIMENTAL

### 2.1. Definición de variables de diseño.

**Tabla 5. Variables de diseño de la planta piloto**

Símbolo	Variable	Unidades
<b>T</b>	Temperatura de la leche	°C
<b>t</b>	Temperatura del servicio	°C
<b>θ</b>	Tiempo.	s
<b>k</b>	Conductividad térmica	W/m°C
<b>C<sub>p</sub></b>	Calor Específico	J/kg.°C
<b>ρ</b>	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
<b>μ</b>	Viscosidad	kg/m.s
<b>q</b>	Flujo de Calor	W
<b>Q</b>	Calor	J
<b>φ</b>	Caudal	m <sup>3</sup> /s
<b>m</b>	Masa	kg
<b>ṁ</b>	Flujo másico	kg/s
<b>G</b>	Velocidad de flujo másico por unidad de área	kg/m <sup>2</sup> .s
<b>P</b>	Presión	Bar
<b>L<sub>e</sub></b>	Longitud efectiva	m
<b>A<sub>T</sub></b>	Área de transferencia de calor	m <sup>2</sup>
<b>A<sub>f</sub></b>	Área de flujo	m <sup>2</sup>
<b>U<sub>A</sub></b>	Coeficiente global de transmisión de calor asumido	W/m <sup>2</sup> . °C
<b>U<sub>C</sub></b>	Coeficiente global de transmisión de calor calculado	W/m <sup>2</sup> . °C

**Tabla 6. Corrientes que intervienen en el diagrama de flujo**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b>L</b>	Alimentación (Leche cruda).
<b>L<sub>(0)</sub></b>	Leche que retorna al pasteurizador
<b>L<sub>(1-6)</sub></b>	Leche tratada térmicamente
<b>WM</b>	Agua de municipio.
<b>HW</b>	Agua caliente.
<b>C</b>	Cultivo liofilizado.
<b>A</b>	Azúcar.
<b>F</b>	Saborizante.
<b>E</b>	Estabilizante
<b>Y1</b>	Yogur.
<b>Y2</b>	Yogur enfriado.

**Tabla 7. Abreviaturas usadas en los cálculos**

<b>Símbolo</b>	<b>Variable</b>
<b>Re</b>	Número de Reynolds
<b>Pr</b>	Número de Prandlt
<b>Nu</b>	Número de Nusselt
<b>MLDT</b>	Diferencia de temperaturas media logarítmica
<b>NTU</b>	Número de Unidades de transferencia.
<b>R</b>	Regeneración.

## **2.2. Caracterización de la materia prima.**

Se determina la cantidad de agua (expresada como humedad) y grasa, además propiedades de diseño como viscosidad y densidad de leche cruda obtenida en Lloa, Sur de Quito.

**2.2.1. Determinación del contenido de grasa.** El método se basa en la separación mediante acidificación y centrifugación la materia grasa contenida en la leche, y determinar el contenido de grasa mediante lectura en un butirómetro estandarizado. (Realizado en el laboratorio OSP, Facultad de Ciencias Químicas de la universidad Central del Ecuador, MÉTODO MAL-13/AOAC 925.10.)

**2.2.2. Determinación de humedad.** El método se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa, de la muestra desecada hasta masa constante en estufa de aire. (Realizado en el laboratorio OSP, Facultad de Ciencias Químicas de la universidad Central del Ecuador, MÉTODO MAL-13/AOAC 925.10.)

**2.2.3. Determinación de viscosidad.** Realizado en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central de Ecuador.

**2.2.3.1. Equipo.**

- Reómetro

**2.2.3.2. Procedimiento del uso de reómetro.**

- Encender el compresor y abrir los filtros de aire para eliminar toda el agua que se pudiera encontrar condensada.
- Encender el Reómetro y esperar hasta tener una presión de 2,7 bares, que se indica en el panel de control del equipo, retirar la protección del rotor.
- Con ayuda del software RHEOPLUS V3.40 realizar las pruebas de inercia del equipo sin colocar el usillo (tool-master).
- Seleccionar el tool-master con su respectiva copa y colocarlos en el reómetro, realizar la prueba de inercia del respectivo elemento de medida.
- Establecer la temperatura de inicio en 4°C
- Colocar la muestra, aproximadamente 20 ml en la copa.
- Poner el elemento de medida en la posición de medida y resetear la Fuerza Normal (Normal Force).
- Determinar la curva de viscosidad en función de la temperatura.
- Oprimir el icono start test para empezar el ensayo.



**2.2.4. Determinación de densidad.** Se realiza con el método de la probeta. En este método, la masa del líquido se determina pesando con la balanza la probeta vacía y la probeta con líquido, el volumen del líquido se observa en la probeta.

**2.2.5. Determinación de pH.** Se realiza con el método del pH-metro, en este método se hace uso de un pH-metro para realizar la medida, el fundamento de este equipo consiste en realizar la medida del pH por un método potenciométrico.

Este método se basa en el hecho de que entre dos disoluciones con distinta concentración de iones hidrógeno  $[H^+]$  se establece una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial determina que cuando las dos disoluciones se ponen en contacto se produzca un flujo de  $[H^+]$ , o en otras palabras, una corriente eléctrica.

**2.2.6. Determinación de contenido de sólidos.** Se obtiene mediante la diferencia entre el contenido de sólidos totales y el contenido de grasa

### **2.3. Elaboración de yogur.**

Se realiza con el objetivo de determinar las condiciones de operación del proceso.

El fundamento de este procedimiento es la fermentación láctica, la cual transforma la lactosa en ácido láctico, se confirma con un descenso en el pH de la leche y el cambio de consistencia y viscosidad.

#### **2.3.1. Materiales y equipos.**

- Estufa.
- Reverbero.
- Autoclave.
- pH-metro.  $A=(\pm 0.01)$   $R=(0-14)$
- Termómetro.  $A=(\pm 1^\circ C)$   $R=(0-150^\circ C)$
- Balanza  $A=(\pm 0,0001g)$   $R=(0-250g)$
- Cronómetro.  $A=(\pm 1 s)$   $R=(0-60 min)$
- Olla de acero inoxidable.  $V=2000 mL$

- Vaso de precipitación. V=1000 mL
- Vaso de precipitación. V=50 mL
- Embudo de vidrio.
- Caja Petri.
- Probeta V=100 mL

### 2.3.2. Sustancias y reactivos.

- Leche
- Fermento liofilizado de la casa DANISCO. (Lactobacillus Bulgaricus y Streptococcus Thermophilus en composición 50/50)
- Hielo  $H_2O_{(s)}$
- Azúcar  $C_6H_{12}O_6$
- Agua destilada  $H_2O_{(s)}$
- Saborizante
- Gelatina sin sabor

### 2.3.3. Procedimiento.

- Esterilización del material:** Se coloca por 40 minutos en el autoclave todo el material a ser usado.
- Pasteurización de la leche:** Se calienta 1 L de leche hasta la temperatura de 70 °C durante 15 minutos.
- Enfriamiento:** Se enfría a la temperatura de inoculación (42°C) mediante un recipiente con hielo.
- Inoculación:** Se pesan 0.014g de fermento liofilizado y se coloca en la leche, se agrega 5 g de gelatina sin sabor.
- Fermentación:** Se mantiene la temperatura constante aislando el recipiente térmicamente y colocado en la estufa para mantener la temperatura constante de 42°C, se toma el tiempo en el cual empieza a cuajar la leche.
- Agitación:** Una vez que la leche ha empezado a cuajarse y cambiar de consistencia se agita suavemente y se mide el pH.
- Medición del tiempo de reacción:** Se toma la medición del tiempo total de reacción en cada ensayo, hasta que el pH llegue a una medición inferior de 4.6.
- Adición de sabor y azúcar:** Se agrega el 10% con respecto a la cantidad de yogur, se agrega saborizante artificial en un porcentaje de 2% y 1% de estabilizante que en este caso es gelatina sin sabor.

*i. Enfriamiento:* Se enfría a la temperatura de 4°C.

*j. Refrigeración:* Se almacena bajo refrigeración para evitar la post acidificación.

**NOTA:** Se repite el procedimiento por 3 veces para encontrar un tiempo máximo en el cual se da la fermentación láctica, el cual será tomado como tiempo de reacción en la marmita.

#### **2.4. Análisis del yogur elaborado en el laboratorio.**

El objetivo de los análisis es encontrar la viscosidad y densidad del producto obtenido en función de diferentes temperaturas para poder utilizarlos en el diseño de los equipos

**2.4.1. Determinación de viscosidad.** Realizado en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central de Ecuador. El procedimiento es detallado en el literal 2.2.3.

**2.4.2. Determinación de densidad.** Se realiza en con el método de la probeta. En este método, la masa del líquido se determina pesando con la balanza la probeta vacía y la probeta con líquido, el volumen del líquido se observa en la probeta.

### 3. DATOS EXPERIMENTALES

#### 3.1. Caracterización de la materia prima.

Se presentan los datos producto de los análisis de la leche cruda obtenida en Lloa, Sur de Quito.

**Tabla 8. Propiedades de la leche cruda**

Propiedad	Porcentaje
Humedad	86,94
Sólidos Totales	13,06
Contenido de grasa	4,19
Sólidos no grasos	8,87
pH	6,6

**Nota:** La sumatoria de la humedad y sólidos totales representa el 100 % de la cantidad de leche. El contenido de grasa sumado a los sólidos no grasos es igual al contenido de sólidos totales.

**Tabla 9. Viscosidad de la leche a diferentes temperaturas (velocidad cizallamiento 50 s<sup>-1</sup>)**

Dato	Temperatura [°C]	Viscosidad [Pa·s]
1	3,58	0,00381
2	5,09	0,00384
3	8,98	0,00373
4	11,8	0,00354
5	14,1	0,00336
6	17,1	0,00315
7	19,5	0,00295
8	22,2	0,00276
9	24,7	0,00258
10	27,3	0,00241
11	30	0,00226
12	32,3	0,00212
13	35	0,00199
14	37,6	0,00187
15	40	0,00176

**Continuación Tabla 9**

16	42,7	0,00166
17	45	0,00158
18	47,7	0,00149
19	50,3	0,00141
20	52,6	0,00135
21	55,3	0,00128
22	57,9	0,00122
23	60,3	0,00117
24	62,9	0,00112
25	65,3	0,00108
26	67,9	0,00105
27	70,5	0,00102
28	72,9	0,000994
29	75,5	0,00096
30	78,1	0,000948
31	80,5	0,000977

**Nota:** Datos tabulados por el programa, el diagrama obtenido por el reómetro se encuentra en el ANEXO E.

**Tabla 10. Densidad de la leche a diferentes temperaturas**

<b>Dato</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>
1	10	1037,7
2	20	1036,1
3	30	1034,1
4	40	1031,7
5	50	1028,9
6	60	1025,7
7	70	1022,1
8	80	1018,1

En base a las ecuaciones (1) y (2), con los datos de la tabla 8 se ha generado una tabla con las propiedades térmicas de la leche para su uso en el cálculo del pasteurizador.

**Tabla 11. Propiedades térmicas de la leche a diferentes temperaturas**

Temperatura	Cp [J/kg.C]	k [W/m.C]
10	3766	0,529
20	3776	0,547
30	3786	0,563
40	3796	0,578
50	3806	0,592
60	3816	0,604
70	3826	0,615
80	3836	0,624
90	3846	0,632

### 3.2. Elaboración de yogur.

Se realizaron 3 ensayos para comprobar el tiempo que dura la fermentación (tiempo que tarda en disminuir el pH hasta 4,5) y así obtener un tiempo promedio. Las cantidades de azúcar, estabilizante y saborizante corresponden al 10%, 2 % y 1% de la cantidad de leche usada respectivamente, con lo que se tienen las siguientes cantidades. En este ensayo no se utilizó estabilizante debido a que se trabajó con pequeñas cantidades de materia prima y la separación solo llega a ser un factor determinante cuando se produce grandes cantidades de yogur

**Tabla 12. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 1**

Etapa	Temperatura, °C	Tiempo de operación	pH	Masa de cultivo [g]	Masa de azúcar [g]	Masa de saborizante [g]
<i>Inicial</i>	20	-	6,8			
<i>Pasteurización</i>	75	10 min	6,8			
<i>Enfriamiento</i>	42	-	6,8			
<i>Fermentación</i>	42	5h, 08 min	4,5	0,0141		
<i>Enfriamiento</i>	20	-	4,5		103,6	10,3

**Tabla 13. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 2.**

<b>Etapas</b>	<b>Temperatura, °C</b>	<b>Tiempo de operación</b>	<b>pH</b>	<b>Masa de cultivo [g]</b>	<b>Masa de azúcar [g]</b>	<b>Masa de saborizante [g]</b>
<i>Inicial</i>	20	-	6,6			
<i>Pasteurización</i>	75	10 min	6,6			
<i>Enfriamiento</i>	42	-	6,6			
<i>Fermentación</i>	42	5h, 22 min	4,5	0,0145		
<i>Enfriamiento</i>	20	-	4,5		103,6	10,3

**Tabla 14. Condiciones de operación para elaboración de yogur, ensayo 3**

<b>Etapas</b>	<b>Temperatura, °C</b>	<b>Tiempo de operación</b>	<b>pH</b>	<b>Masa de cultivo [g]</b>	<b>Masa de azúcar [g]</b>	<b>Masa de saborizante [g]</b>
<i>Inicial</i>	20	-	6,6			
<i>Pasteurización</i>	75	10 min	6,6			
<i>Enfriamiento</i>	42	-	6,6			
<i>Fermentación</i>	42	5h, 15 min	4,5	0,0144		
<i>Enfriamiento</i>	20	-	4,5		103,6	10,3

### 3.3. Análisis del yogur.

**Tabla 15. Viscosidad del yogur a diferentes temperaturas (velocidad cizallamiento 50 s<sup>-1</sup>)**

<b>Dato</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Viscosidad [Pa·s]</b>
1	9,36	0,226
2	9,63	0,218
3	10,8	0,214
4	12,7	0,208
5	14,7	0,201
6	16,2	0,193
7	17,5	0,185
8	18,8	0,177
9	20,3	0,168
10	21,8	0,16
11	23,3	0,152

**Continuación Tabla 15**

12	24,6	0,145
13	25,9	0,139
14	27,3	0,133
15	28,7	0,127
16	30,1	0,122
17	31,4	0,116
18	32,8	0,111
19	34,1	0,106
20	35,5	0,101
21	36,8	0,0958
22	38,2	0,0907
23	39,5	0,0859
24	40,8	0,0815
25	42,2	0,0775
26	43,5	0,074
27	44,9	0,0708
28	46,2	0,0679
29	47,5	0,0652
30	48,9	0,0628
31	50,2	0,0605

**Nota:** Datos tabulados por el programa, el diagrama obtenido por el reómetro se encuentra en el ANEXO F.

**Tabla 16. Densidad del yogur a diferentes temperaturas**

<b>Dato</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>
1	10	1113
2	20	1111
3	30	1109
4	40	1107
5	45	1105
6	50	1104



## 4. CÁLCULOS

### 4.1. Escalado.

El marco experimental se realizó con una base de cálculo de 1L, cuyo valor en masa corresponde a 1,038 kg.

$$m_{Lexp} = 1L * 1,038 \frac{kg}{L} = 1,038 \text{ kg}$$

En donde:

$m_{Lexp}$ : Masa de leche cruda experimental.

La cantidad de cultivo liofilizado que se encuentra en el sobre es de 0,734 g, que se usan para una producción de 50 L.

$$m_{Cexp} = \frac{0,734 \text{ g}}{50 \text{ L}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * 1L = 0,000014 \text{ kg}$$

En donde:

$m_{Lexp}$ : Masa de cultivo liofilizado experimental.

**Tabla 17. Cantidad de materia prima usada en el marco experimental**

Variable	Materia Prima [kg]	ETAPA		
		Pasteurización	Fermentación	Mezclado
$m_{Lexp}$	Leche	1,036	-	-
$m_{Cexp}$	Cultivo liofilizado	-	0,000014	-
$m_{Aexp}$	Azúcar	-	0,1036	-
$m_{Eexp}$	Estabilizante	-	0,02076	-
$m_{Fexp}$	Saborizante	-	-	0,01036

El diseño de la planta piloto se realiza para una capacidad de 100 L.

La temperatura de alimentación por ser parte de un equipo de laboratorio se realizará a temperatura ambiente, además la duración de una práctica de laboratorio será únicamente de una hora.

$$m_L = \frac{100 \text{ L}}{1\text{h}} * 1,036 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 103,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$M_F = 103,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Se calcula la cantidad de cultivo liofilizado a partir de la cantidad de cultivo liofilizado que se encuentra en el sobre 0,734 g, cantidad que se usa para un lote de 50 L.

$$m_C = \frac{0,734 \text{ g}}{50 \text{ L}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * 100 \text{ L} = 0,0014 \text{ kg}$$

Partiendo de este dato se pueden escalar todas las cantidades necesarias para la producción en las diferentes etapas con lo que se tiene:

**Tabla 18. Cantidad de materia prima por lote de producción**

COMPONENTES	Masa [kg]
Leche	103,8
Azúcar	10,38
Cultivo Liofilizado	0,0014
Estabilizante	2,076
Saborizante y colorante	1,038
TOTAL	117,30

#### 4.2. Balance de masa por equipos.

En base al escalado se procede a realizar balances para la producción de un lote de yogur.

- Se define el punto de balance y sus fronteras.
- Se identifica las corrientes de entrada y salida.
- Se identifican los componentes involucrados en cada corriente
- Se plantea las ecuaciones de balance.

Se plantea la ecuación general para el balance de masa, y se proceden a realizar los pasos anteriores.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Entrada por las} \\ \text{fronteras del sistema} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Generación} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Consumo dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right] = \\ \left[ \begin{array}{c} \text{Salida por las} \\ \text{fronteras del sistema} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right] \quad (57)$$

El proceso de producción de yogur es un sistema abierto por lotes, la acumulación y consumo en la fermentación láctica tienen modelos cinéticos aún no establecidos con certeza debido a la complejidad de las reacciones bioquímicas que se producen, además; se debe tener en cuenta el crecimiento microbiano que impide precisar con exactitud el modelo adecuado para usarlo en el diseño de un reactor.

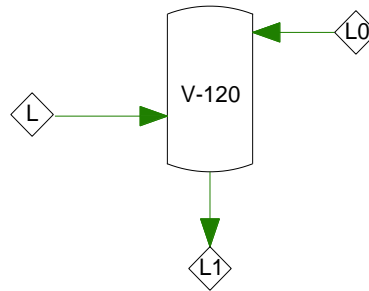
Del marco experimental se pudo comprobar que el balance de masa se cumple como un sistema abierto, sin acumulación ni consumo y sin considerar pérdidas por evaporación en ningún equipo se realiza el balance directamente con la siguiente ecuación:

$$ENTRADA = SALIDA \quad (58)$$

Se procede a realizar el balance para la producción de un lote de yogur y el sistema se define en base a los equipos en los que ocurre un cambio en las propiedades físicas del producto. Para facilitar el entendimiento se ha dividido a la planta en 2 etapas, la primera etapa está relacionada con el tratamiento de la leche y su equipo principal es el pasteurizador por lo que se ha denominado a esta etapa como etapa 1, la segunda etapa está relacionada con el procedimiento de producción de yogur y se ha denominado etapa 2 en el diagrama de flujo.

#### **4.2.1. Balance de masa en la etapa de Pasteurización.**

**4.2.1.1. Tanque de balance V-110.** Este tanque se coloca en caso de que la temperatura de la leche, a la salida del tubo de retención, sea menor que la requerida para lograr la esterilización completa del producto, para este caso se asume que el proceso funciona idealmente por lo que la corriente L0 que corresponde al retorno de caudal tiene un valor de 0 kg.

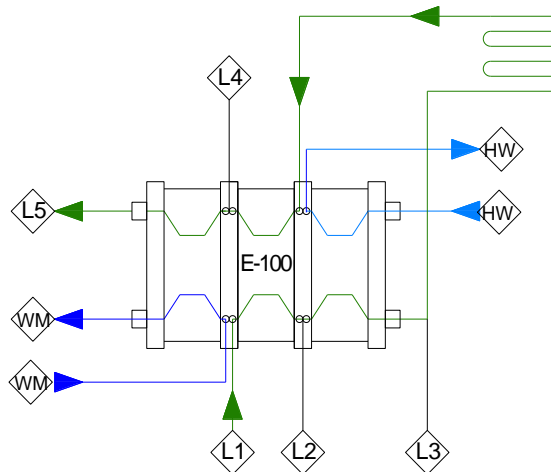


**Figura 35. Corrientes en el punto de balance de masa tanque de balance V-120**

**Tabla 19. Balance de masa en el tanque de balance V-120**

COMPONENTES	Entrada		Salida
	L2	L0	L1
Leche	103,8	0	103,8
Azúcar	-	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-	-
Estabilizante	-	-	-
Saborizante y colorante	-	-	-
TOTAL	103,8	0	103,8

**4.2.1.2. Pasteurizador E-100.** El pasteurizador está dividido en 3 zonas como se indicó antes (ver figura 6). Por esto se ha realizado un balance zona a zona, aunque no haya un cambio de masa, posteriormente veremos cómo cambia la entalpía, es por eso que se ha modificado el nombre de la corriente a la salida de cada zona, ya que el servicio no está en contacto directo con el producto sino haciendo intercambio de calor, no se considera en el balance de masa.



**Figura 36. Corrientes en el punto de balance de masa pasteurizador E-100**

**Tabla 20. Balance de masa en la zona de regeneración del pasteurizador (Lado frío)**

COMPONENTES	Entrada	Salida
	L1	L2
Leche	103,8	103,8
Azúcar	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-
Estabilizante	-	-
Saborizante y colorante	-	-
TOTAL	103,8	103,8

**Tabla 21. Balance de masa en la zona de calentamiento del pasteurizador**

COMPONENTES	Entrada	Salida
	L2	L3
Leche	103,8	103,8
Azúcar	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-
Estabilizante	-	-
Saborizante y colorante	-	-
TOTAL	103,8	103,8

**Tabla 22. Balance de masa en la zona de regeneración del pasteurizador (Lado caliente)**

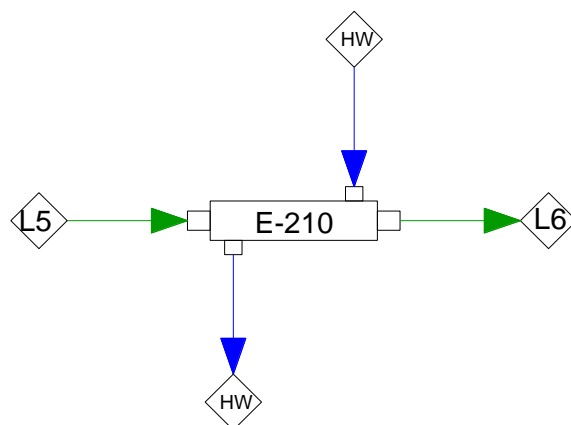
COMPONENTES	Entrada	Salida
	L3	L4
Leche	103,8	103,8
Azúcar	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-
Estabilizante	-	-
Saborizante y colorante	-	-
TOTAL	103,8	103,8

**Tabla 23. Balance de masa en la zona de enfriamiento del pasteurizador**

COMPONENTES	Entrada	Salida
	L4	L5
Leche	103,8	103,8
Azúcar	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-
Estabilizante	-	-
Saborizante y colorante	-	-
TOTAL	103,8	103,8

#### 4.2.2. Balance de masa en la etapa de fermentación y mezcla.

##### 4.2.2.1. Pre calentador E-210.



**Figura 37. Corrientes en el punto de balance de masa pre calentador E-210**

**Tabla 24. Balance de masa en el pre calentador E-210**

COMPONENTES	Entrada	Salida
	L5	L6
Leche	103,8	103,8
Azúcar	-	-
Cultivo Liofilizado	-	-
Estabilizante	-	-
Saborizante y colorante	-	-
TOTAL	103,8	103,8

#### 4.2.2.2. Fermentador R-200

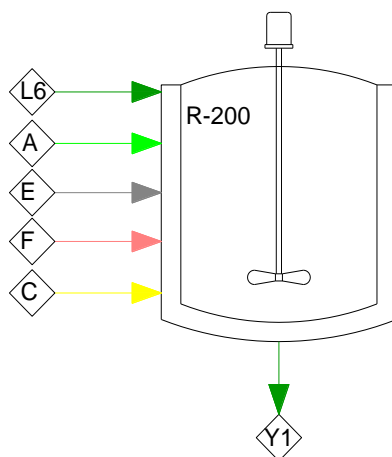


Figura 38. Corrientes en el punto de balance de masa fermentador R-200

Tabla 25. Balance de masa en el fermentador R-200

COMPONENTES	Entrada					Salida
	L6	A	C	E	F	Y1
Leche	103,8	-	-	-	-	103,8
Azúcar	-	10,38	-	-	-	10,38
Cultivo Liofilizado	-	-	0,0014	-	-	0,0014
Estabilizante	-	-	-	2,076	-	2,076
Saborizante y colorante	-	-	-	-	1,038	1,038
TOTAL	117,30					117,30

#### 4.2.2.3. Enfriador E-220.

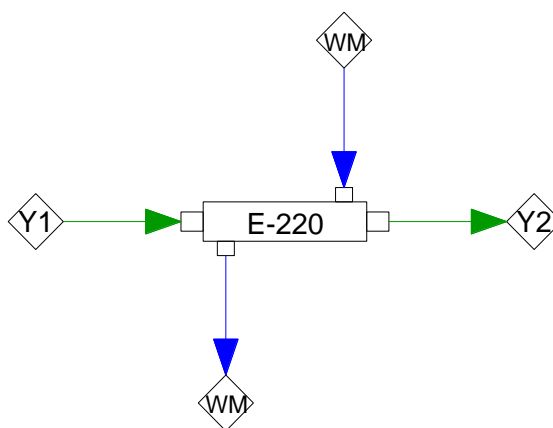


Figura 39. Corrientes en el punto de balance de masa enfriador E-220.

**Tabla 26. Balance de masa en el enfriador E-220.**

COMPONENTES	E	S
	Y1	Y2
Leche	103,8	103,8
Azúcar	10,38	10,38
Cultivo Liofilizado	0,0014	0,0014
Estabilizante	2,076	2,076
Saborizante y colorante	1,038	1,038
TOTAL	117,30	117,30

### 4.3. Procedimiento de cálculo de los equipos

#### 4.3.1. Diseño del tanque de recepción V-110.

- Dimensiones del tanque.
- Dimensiones del agitador.
- Potencia del agitador.

#### 4.3.2. Diseño del Pasteurizador E-201. Constará de 3 intercambiadores de placas.

- a. Zona de calentamiento:
  - Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.
  - Cálculo del área total de transferencia de calor.
  - Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.
- b. Zona de regeneración:
  - Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.
  - Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.
  - Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.
- c. Zona de enfriamiento:
  - Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.
  - Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.
  - Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.



d. Tubo de retención:

- Cálculo del tiempo de retención
- Cálculo de la longitud de la tubería.

#### **4.3.3. *Diseño del fermentador R-200.***

- Dimensiones del tanque.
- Dimensiones del agitador:
  - Potencia del agitador
- Cálculo de las pérdidas de calor.
- Diseño del aislamiento térmico

#### **4.3.4. *Diseño del pre-calentador de la leche E-210. (Intercambiador de calor de tubo concéntrico.)***

- Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.
- Cálculo del área total de transferencia de calor.
- Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.

#### **4.3.5. *Diseño del enfriador de yogur E-220. (Intercambiador de calor de tubo concéntrico.)***

- Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.
- Cálculo del área total de transferencia de calor.
- Cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador.

#### **4.3.6. *Especificaciones de la envasadora.***

#### **4.3.7. *Especificaciones del cuarto frío.***

#### **4.3.8. *Especificaciones de bombas***

- Cálculo del CNPA disponible
- Presión de la bomba

#### 4.4. Diseño del tanque de recepción (silo) V-110:

**4.4.1. Volumen del tanque V-110.** El tanque de almacenamiento debe contener la capacidad total de producción de la planta siendo este de 100 L, se toma un factor de seguridad en el volumen del 20% con el fin de evitar contratiempos en el vaciado o llenado del equipo.

$$V_{V-110} = V_L + V_{HOLGURA} \quad (59)$$

$$V_{HOLGURA} = F_s \times V_L \quad (60)$$

En donde:

$V_L$ : Volumen de la leche.

**Tabla 27. Variables en el diseño del tanque V-110**

VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDAD	VALOR
$V_L$	Volumen de leche que se recepta en el tanque	L/h	100
$F_s$	Factor de seguridad	-	0,2
$V_{HOLGURA}$	Volumen de holgura	Litros	20
$V_{V-110}$	Volumen Del tanque Silo V-110	Litros	120

#### 4.4.2. Dimensiones del tanque V-110.:

$$V_{CILINDRO} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times H \quad (61)$$

$$V_{BASE} = \pi \frac{h}{3} \left( \frac{D^2}{4} + \frac{D}{2} \times \frac{d}{2} + \frac{d^2}{4} \right) \quad (62)$$

De la ecuación (46) se tiene:

$$D = \frac{2}{3} H$$

Además se asume un fondo cónico con la siguiente relación:

$$h = \frac{1}{6} H \quad (63)$$

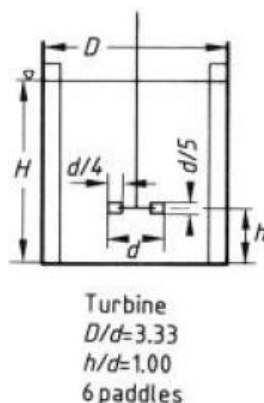
Se asume un valor del diámetro y se itera hasta conseguir un valor igual al del volumen del tanque con un error de  $\pm 1$  L.

**Tabla 28. Iteraciones del diámetro del tanque V-110**

ITERACIÓN		1	2	3
Diámetro del cilindro	D, [m]	0,500	0,55	0,600
Altura del cilindro	H, [m]	0,750	0,825	0,900
Altura del cono truncado	h, [m]	0,125	0,138	0,150
Diámetro del cono truncado	d, [m]	0,019	0,019	0,019
$V_{\text{CILINDRO}}$	[L]	73,63	89,09	106,03
$V_{\text{CONO}}$	[L]	8,18	10,89	14,14
$V_{\text{TOTAL}}$	[L]	81,81	99,98	120,16

Debido a que es un recipiente a presión constante se usará un espesor recomendado de 3 mm.

**4.4.3. Potencia del agitador del tanque V-110.** Para la agitación del silo se ha seleccionado un agitador de tipo turbina de 6 aspas, el cual tiene las siguientes relaciones geométricas:



**Figura 40. Relaciones geométricas para un agitador tipo turbina de 6 aspas**

**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capítulo de agitación, p.7, Figura 8.

Se realiza el cálculo de las dimensiones del agitador de acuerdo a las relaciones encontradas en la bibliografía consultada.

Las dimensiones del agitador son las siguientes:

**Tabla 29. Dimensiones del agitador del tanque V-110**

AGITADOR		Unidades
$d_A$	0,18	m
$h_A$	0,18	m

Se realiza el cálculo del número de Reynolds, teniendo en cuenta que la velocidad del agitador recomendada para la agitación de la leche es de está entre 20-150 RPM, en este caso escogeremos una velocidad de 120 RPM ( $2 \text{ s}^{-1}$ ), esto debido a que se debe evitar la aireación de la leche.

De la ecuación (47)

$$\text{Re} = \frac{2 \text{ s}^{-1} \times (0,18 \text{ m})^2 \times 1038 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,00355 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 1,9 \times 10^4$$

Se obtiene un número de Reynolds que corresponde a régimen turbulento por lo que es necesario colocar deflectores tal y como se muestra en la figura 40.

Para calcular la potencia usamos la carta que correlaciona el número de potencia y el número de Reynolds.

De la ecuación (48) se obtiene con el número de Reynolds y la curva gs un  $N_p = 5$ . El trazado se encuentra en el ANEXO G.

$$P = 5 \times (2 \text{ s}^{-1})^3 \times (0,18 \text{ m})^5 \times 1038 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7,9 \text{ W}$$

$$P = 8 \text{ W}$$

Por lo tanto se necesita un motor de 8 W o mayor para homogenizar la mezcla.

Se calcula el tiempo necesario para homogenizar la leche con la carta que correlaciona el número de Reynolds con el producto entre el tiempo de mezcla y la velocidad del agitador.

$$n\theta = y \tag{64}$$

Con el valor del número de Reynolds y la curva (hs) se obtiene un valor de  $y \cong 100$ . El trazado se encuentra en el ANEXO H.

$$\theta = \frac{100}{(2 \text{ s}^{-1})}$$

$$\theta = 50 \text{ segundos}$$

Para lograr homogenizar la leche se requieren de 50 segundos.

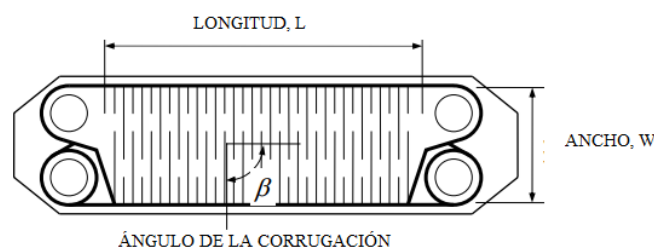
#### 4.5. Diseño del pasteurizador E-201.

El pasteurizador está dividido en 3 zonas las cuales se detallan a continuación, el material en que se fabrican las placas es acero inoxidable AISI 304. Las placas y su separación se pueden especificar de acuerdo a las encontradas en el mercado, para este caso se toman datos de placas de la casa DUDADIESEL: sin embargo, al cambiar el tamaño de las placas y su área de transferencia también cambia el número de Reynolds de la leche lo que produce cambios en el coeficiente global de transporte de calor del equipo.

Debido a que este es un equipo para grandes caudales se especificará un pasteurizador para 500 L/h de leche, el cual trabajará durante aproximadamente 12 minutos para completar la pasteurización de la leche.

**Tabla 30. Especificaciones de las placas del pasteurizador**

Especificación	Nomenclatura	Valor	Unidades
Longitud placa	L	0,4648	m
Ancho de la placa	W	0,737	m
Espesor de la placa	$e_p$	0,0003	m
Separación de las placas	$E_p$	0,0014	m
Profundidad placa	b	0,0022	m
Diámetro equivalente	$D_e$	0,0044	m
Conductividad térmica acero	k	16,3	W/m.C
Área de transferencia	$A_f$	0,036	m <sup>2</sup>
Ángulo de la corrugación	$\theta$	30 °	



**Figura 41. Gráfico de una placa del pasteurizador**

##### 4.5.1. Tanque de balance V-120.

**4.5.1.1. Volumen del tanque V-120.** Debido a que este tanque está diseñado para una altura constante y se ha seleccionado un volumen de 20 L.

De las ecuaciones (59) y (60) se tiene:

$$V_{V-120} = V_L + V_{HOLGURA}$$

$$V_{HOLGURA} = F_s \times V_L$$

**Tabla 31. Variables en el diseño del tanque V-120**

VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDAD	VALOR
$V_F$	Volumen de leche para balance	L/h	20
$F_s$	Factor de seguridad	-	0,2
$V_{HOLGURA}$	Volumen de holgura	Litros	4
$V_{V-120}$	Volumen Del tanque V-101	Litros	24

#### 4.5.1.2. Dimensiones del tanque V-120

De las ecuaciones (61) y (46):

$$V_{CILINDRO} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times H$$

$$D = \frac{2}{3}H$$

Se asume un valor del diámetro y se itera hasta conseguir un valor igual al del volumen del tanque con un error de  $\pm 1$  L.

**Tabla 32. Iteraciones del diámetro del tanque V-120**

ITERACIÓN		1	2	3
Diámetro del cilindro	D, [m]	0,300	0,25	0,29
Altura del cilindro	H, [m]	0,450	0,375	0,435
$V_{TOTAL}$	[L]	26,50	18,41	24,77

**4.5.2. Programa de temperaturas en el pasteurizador E-201.** Las condiciones de operación para la obtención del producto se determinan experimentalmente, sin embargo para el diseño se deben asumir los flujos de los servicios de agua fría y caliente.

**Tabla 33. Temperaturas en el pasteurizador E-201**

ZONA	Leche		Fluido de servicio	T Entrada	T Salida
	T Entrada	T Salida			
<b>Zona de Calentamiento</b>	$T_R$	75	Agua caliente	Ti	Tf
<b>Zona de Regeneración</b>	10	$T_R$	Leche Pasteurizada	75	$75-T_R$
<b>Zona de Enfriamiento</b>	$T_R$	19	Agua Fría	Ti	Tf

**Condición:** La leche cruda entra por la zona de regeneración a un máximo de 10°C debido a que los estudiantes deben traer la leche refrigerada para las prácticas ya que al mantenerla a una temperatura superior corre el riesgo de que las bacterias empiecen a reproducirse a mayor velocidad dañando la estructura de la leche.

La leche entra en la zona de regeneración para ser calentada por la leche, que ya ha sido tratada térmicamente y que después de salir del tubo de retención se mantiene a una temperatura de 75°C. La temperatura de salida de esta zona se calcula a través del porcentaje de regeneración del pasteurizador. En este caso suponemos una regeneración del 80%, partiendo de este porcentaje calculamos la temperatura de salida de la zona de regeneración mediante la siguiente ecuación.

$$R = \frac{T_R - T_E}{T_P - T_E} \quad (65)$$

En donde:

R: Regeneración.

$T_R$ : Temperatura a la salida de la regeneración.

$T_P$ : Temperatura de pasteurización.

$T_E$ : Temperatura de entrada.

Reacomodando los términos tenemos:

$$\begin{aligned} T_R &= R \times (T_P - T_E) + T_E \\ T_R &= 0,80 \times (75 - 10) + 10 \\ T_R &= 62 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

La temperatura de la leche alcanza entonces un valor de 62 °C mediante el aprovechamiento del calor que tiene la leche tratada térmicamente a la salida de calentamiento. Posteriormente se realiza el calentamiento mediante intercambio de calor con agua caliente hasta una temperatura de 75 °C y pasa a través de un tubo de retención para asegurar la eliminación de todas las bacterias.

La leche tratada térmicamente intercambia calor con la leche cruda que entra en la zona de regeneración y se enfría hasta una temperatura de 23 °C. Luego de ser enfriada por la leche cruda, se alcanza una temperatura de 17 °C en la zona de enfriamiento mediante intercambio de calor con agua fría proveniente de una cisterna o del sistema de agua potable.

Es recomendable con el fin de disminuir el área de intercambio de calor del equipo, utilizar un flujo de agua igual o mayor al doble que el flujo de la leche tomando en cuenta las

recomendaciones, si se realiza el balance de energía en la zona de calentamiento y enfriamiento podemos obtener la temperatura de salida del servicio de agua caliente y agua fría:

#### 4.5.2.1. Zona de calentamiento

$$m_L \times C_{pL} \times \Delta T_L = -m_W \times C_{pW} \times \Delta T_W \quad (66)$$

$$m_W = 2m_L$$

$$\Delta T_W = -\frac{m_L \times C_{pL} \times \Delta T_L}{2m_L \times C_{pW}}$$

$$\Delta T_W = T_{fw} - T_{iw}$$

$$T_{fw} = T_{iw} - \frac{m_L \times C_{pL} \times \Delta T_L}{2m_L \times C_{pW}}$$

Se evalúa el calor específico a temperatura media de la leche, para el agua se ha evaluado entre 70 y 80 °C debido a que el Cp no varía significativamente en el intervalo de 0-100 °C con lo que se obtiene:

$$T_{fw} = 74^\circ\text{C}$$

#### 4.5.2.2. Zona de enfriamiento

De la ecuación (66)

$$-m_L \times C_{pL} \times \Delta T_L = m_W \times C_{pW} \times \Delta T_W$$

$$m_W = 2m_L$$

$$\Delta T_W = -\frac{C_{pL} \times \Delta T_L}{m_L \times C_{pW}}$$

$$\Delta T_W = T_{fw} - T_{iw}$$

$$T_{fw} = T_{iw} - \frac{m_L \times C_{pL} \times \Delta T_L}{2m_L \times C_{pW}}$$



Se evalúa el calor específico a temperatura media de la leche, para el agua se ha evaluado entre 15 y 20 °C debido a que el Cp no varía significativamente en el intervalo de 0-100 °C, además la variación de temperatura es únicamente de 6 °C con lo que se obtiene:

$$T_{fw} = 18^{\circ}\text{C}$$

Después de tomar en cuenta todas estas consideraciones el programa de temperaturas es el siguiente:

**Tabla 34. Programa de Temperaturas en el pasteurizador P-201**

ZONA	Leche		Fluido de servicio	T Entrada	T Salida
	T Entrada	T Salida			
<b>Zona de Calentamiento</b>	62	75	<i>Agua caliente</i>	80	74
<b>Zona de Regeneración</b>	10	62	<i>Leche Pasteurizada</i>	75	23
<b>Zona de Enfriamiento</b>	23	17	<i>Agua Fría</i>	15	18

Para el diseño se debe trabajar con flujo másico, para facilidad de cálculo se trabaja en unidades del Sistema Internacional, con lo cual se tiene:

$$\dot{m}_L = 103,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 5 = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

#### 4.5.3. Cálculo para la zona de calentamiento:

##### a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

De la ecuación (8)

$$\text{MLDT} = \frac{(80 - 75) - (74 - 62)}{\ln\left(\frac{(80 - 75)}{(74 - 62)}\right)}$$

$$\text{MLDT} = 8,07$$

##### b. Cálculo de la temperatura media.

De las ecuaciones (9) y (10)

$$T_m = \frac{75 + 62}{2}$$

$$T_m = 68,5^{\circ}\text{C}$$

$$t_m = \frac{80 + 74}{2}$$

$$t_m = 77^\circ\text{C}$$

*c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.*

**Tabla 35. Propiedades fisicoquímicas de la leche a  $T_m=68,5^\circ\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1023	1,17E-03	3824	0,613

**Tabla 36. Propiedades fisicoquímicas del agua a  $t_m=77^\circ\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
973,9	5,75E-04	4229	0,688

*d. Balance de energía.*

Se determina la energía necesaria para elevar la temperatura de la leche desde  $T_i$  (inicial) hasta  $T_f$  (final). De la ecuación (11) tenemos:

$$q = \dot{m}_L \times C_{pL} \times \Delta T$$

$$q = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3824 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (74 - 62)^\circ\text{C}$$

$$q = 7167 \text{ W}$$

*e. Cálculo del área total.*

Es necesario asumir un valor del coeficiente total de transmisión de calor para lo cual empezamos con un valor de  $5000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , que es un valor adecuado para el intercambio entre un sistema agua – agua (PERRY, MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO, 1997).

De la ecuación (12)

$$A_T = \frac{q}{U_A \text{MLDT}}$$

$$A_T = \frac{7167 \text{ W}}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 8,07^\circ\text{C}}$$

$$A_T = 0,178 \text{ m}^2$$

***f. Cálculo del número de placas.***

$$N_P = \frac{A_T}{A_P}$$

$$N_P = \frac{0,178 \text{ m}^2}{0,036 \text{ m}^2}$$

$$N_P = 4,9$$

El número de platos debe ser un número impar por lo que se hace una aproximación al número impar superior, además se necesita un plato extra a cada lado para confinar los canales con lo que tenemos:

$$N_P = 7$$

***g. Cálculo del número de canales.***

De la ecuación (14)

$$N_C = \frac{N_P - 1}{2}$$

$$N_C = \frac{6}{2}$$

$$N_C = 3$$

***h. Cálculo del área de flujo total.***

De la ecuación (15)

$$A_f = W E_P N_C$$

$$A_f = 0,0737 \text{ m} \times 0,0014 \text{ m} \times 3$$

$$A_f = 0,0003 \text{ m}^2$$

***i. Cálculo del diámetro equivalente.***

De la ecuación (16)

$$D_e = 2 \times b$$

$$D_e = 2 \times 0,0022$$

$$D_e = 0,0044 \text{ m}$$

**j. Cálculo del flujo másico por unidad de área.**

De la ecuación (17)

$$G = \frac{\dot{m}}{A_f}$$

- Para la leche.

$$G_{L2} = \frac{\dot{m}_{L2}}{A_f}$$

$$G_{L2} = \frac{0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,036 \text{ m}^2}$$

$$G_{L2} = 466 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

- Para el agua.

$$G_{HW} = \frac{\dot{m}_{HW}}{A_f}$$

$$G_{HW} = \frac{0,288 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,036 \text{ m}^2}$$

$$G_{HW} = 932 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

**k. Determinación de los coeficientes de transmisión de calor.**

De acuerdo a las relaciones de Thonon que se encuentran en la página 21 del documento, e usa los parámetros para una placa con un ángulo de corrugación de 30 °. En donde:

$$C1 = 0,2946$$

$$m = 0,7$$

$$C2 = 0,37$$

$$P = 0,172$$

***Número de Reynolds.***

- Para la leche.

$$Re_{L2} = \frac{G_F \times D_e}{\mu_F}$$

$$Re_{L2} = \frac{466 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \times 0,044 \text{m}}{1,17\text{E} - 03 \frac{\text{kg}}{\text{m. s}}}$$

$$Re_{L2} = 1758,29$$

- Para el agua.

$$Re_{HW} = \frac{G_{HW} \times D_e}{\mu_{HW}}$$

$$Re_{HW} = \frac{932 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \times 0,0044 \text{m}}{5,75\text{E} - 04 \frac{\text{kg}}{\text{m. s}}}$$

$$Re_{HW} = 7121,21$$

***Número de Prandlt.***

- Para la leche.

$$Pr_{L2} = \frac{\mu_L \times C_{PL}}{k_F}$$

$$Pr_{L2} = \frac{1,17\text{E} - 03 \frac{\text{kg}}{\text{m. s}} \times 3824 \frac{\text{J}}{\text{kg. } ^\circ\text{C}}}{0,613 \frac{\text{W}}{\text{m. } ^\circ\text{C}}}$$

$$Pr_{L2} = 7,27$$

- Para el agua.

$$Pr_{HW} = \frac{\mu_{HW} \times C_{PHW}}{k_{HW}}$$

$$Pr_{HW} = \frac{5,75E-04 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \times 4238 \frac{\text{J}}{\text{kg.}^\circ\text{C}}}{0,688 \frac{\text{W}}{\text{m.}^\circ\text{C}}}$$

$$Pr_{HW} = 3,55$$

***Número de Nusselt.***

- Para la leche.

$$Nu_{L2} = C_1 \times Re^m \times Pr^{1/3}$$

$$Nu_{L2} = 0,2946 \times 1758^{0,7} \times 7,27^{1/3}$$

$$Nu_{L2} = 106,65$$

- Para el agua.

$$Nu_{HW} = C_1 \times Re^m \times Pr^{1/3}$$

$$Nu_{HW} = 0,2946 \times 1721,21^{0,7} \times 3,55^{1/3}$$

$$Nu_{HW} = 222,55$$

***Coefficiente individual de transmisión de calor por convección.***

- Para la leche.

$$h_{L2} = \frac{Nu_F \times k_F}{D_e}$$

$$h_{L2} = \frac{106,55 \times 0,613 \frac{\text{W}}{\text{m.}^\circ\text{C}}}{0,0044\text{m}}$$

$$h_{L2} = 14869 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.^\circ\text{C}}$$

- Para el agua.

$$h_{HW} = \frac{Nu_{HW} \times k_{HW}}{D_e}$$

$$h_{HW} = \frac{223,55 \times 0,688 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}{0,0044m}$$

$$h_{HW} = 39939 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**1. Determinación del coeficiente total de transferencia de calor.**

Para el sistema agua-leche en un intercambiador de placas se ha considerado un ensuciamiento de  $8 \times 10^{-5}$  en un tiempo de 14000 s (Lalande y Corrieu, 1980)

De la ecuación (22)

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{L2}} + \frac{1}{h_{HW}} + \frac{e_p}{k_{acero}} + R_d$$

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{14169 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{39939 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{0,0003m}{16,3 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + 8E-5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\frac{1}{U_C} = 0,000194$$

$$U_C = 5147 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Debido a que el coeficiente asumido no es igual al coeficiente calculado se realiza una nueva iteración con el valor calculado.

Usando una hoja de cálculo se realizan iteraciones modificando  $U_A$  hasta que se cumpla la condición  $U_C=U_A$  o lo que es lo mismo  $U_C/U_A=1,00$  se toma como nuevo valor inicial el valor  $U_C$  y se realiza nuevamente el cálculo. Los resultados se tabulan a continuación.

**Tabla 37. Iteraciones en la zona de calentamiento del pasteurizador**

Variable	Unidades	Iteración	
		1	2
$U_A$	$W/m^2C$	5000	5147
$A_T$	$m^2$	0,178	0,173
$N_P$	-	7,0	7,0
$N_C$	-	3,0	3,0
$A_f$	$m^2$	0,0003	0,0003
$G_L$	$kg/m^2s$	466,00	466,00
$Re_{L2}$	-	1758,29	1758,29
$Pr_{L2}$	-	7,27	7,27
$Nu_{L2}$	-	106,65	106,65
$h_{L2}$	$W/m^2C$	14869,96	14869,96
$G_{HW}$	$kg/m^2s$	932,00	932,00
$Re_{HW}$	-	7121,21	7121,21
$Pr_{HW}$	-	3,55	3,55
$Nu_{HW}$	-	223,55	223,55
$h_{HW}$	$W/m^2C$	34939,55	34939,55
$U_C$	$W/m^2C$	5147,33	5147,33
$U_A/U_C$	-	0,97	1,00

Una vez que se ha satisfecho la condición de  $U_C=U_A$  se continúa con el cálculo del NTU, eficiencia y la caída de presión en la zona.

***m. Cálculo del número de unidades de transferencia y efectividad.***

De la ecuación (23)

$$NTU = \frac{U_C A_T}{(mC_p)_{\min}}$$

$$NTU = \frac{5147,33 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 0,173 m^2}{0,144 \frac{kg}{s} \times 3824 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}$$

$$NTU = 1,62$$

De la ecuación (24)

$$c = \frac{(mC_p)_{\max}}{(mC_p)_{\min}}$$



$$c = \frac{0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3824 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}{0,288 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4238 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}}$$

$$c = 0,45$$

De la ecuación (25)

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-NTU(1-c)]}}{1 - c \times e^{[-NTU(1-c)]}}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-2,9(1-0,45)]}}{1 - 0,45 \times e^{[-2,9(1-0,45)]}}$$

$$\varepsilon = 0,72 \cong 72\%$$

***n. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.***

De acuerdo a las relaciones de Thonon se usan los parámetros para una placa con un ángulo de corrugación de 30 °.

De la ecuación (28)

$$L = \frac{A_T}{W}$$

$$L = \frac{0,173 \text{ m}^2}{0,0737 \text{ m}}$$

$$L = 2,35 \text{ m}$$

De las ecuaciones (26) y (27)

- Para la leche.

$$f = 0,37 \times 335,67^{-0,172}$$

$$f = 0,10$$

$$\Delta P_F = \frac{0,10 \times 2 \times 2,35 \times 466^2}{1023 \times 0,0044}$$

$$\Delta P = 23206 \text{ Pa} \cong 0,23 \text{ Bar}$$

- Para el agua.

$$f = 0,37 \times 8032,85^{-0,172}$$

$$f = 0,08$$

$$\Delta P_{HW} = \frac{0,08 \times 2 \times 2,35 \times 932^2}{973,9 \times 0,0044}$$

$$\Delta P_{HW} = 153257 \text{ Pa} \cong 1,53 \text{ Bar}$$

Se repite el mismo algoritmo para la zona de regeneración y la zona de enfriamiento, a continuación se detallan únicamente los cálculos.

#### 4.5.4. Cálculo para la zona de regeneración:

Se realiza el cálculo entre las corrientes L1 (leche fría) y L3 (leche caliente).

##### a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

$$MLDT = \frac{(23 - 10) - (75 - 62)}{\ln\left(\frac{23 - 10}{75 - 62}\right)}$$

$$MLDT = \text{indeterminación.}$$

Debido a que se encuentra el mismo fluido en el lado frío y lado caliente las diferencias en cada extremo resultan iguales ( $\Delta T_1 = \Delta T_2$ ), por lo que se debe aplicar la regla de L'Hopital para salvar la indeterminación.

$$q = U_A A_T \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{0}{0}$$

$$q = U_A A_T |\Delta T_1 - x \Delta T_2| = U_A A_T \Delta T_1 \frac{x - 1}{\ln x}$$

$$q = U_A A_T \Delta T_2$$

Por lo tanto se tiene:

$$MLDT = \Delta T_2 = \Delta T_1 = 13$$

**b. Cálculo de la temperatura media.**

$$T_m = \frac{10 + 62}{2}$$

$$T_m = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_m = \frac{75 + 23}{2}$$

$$t_m = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$$

**c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.**

**Tabla 38. Propiedades fisicoquímicas de la leche a  $T_m=43\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1031	1,78E-03	3799	0,583

**Tabla 39. Propiedades fisicoquímicas de la leche a  $t_m=49\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	K
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1029	1,58E-03	3805	0,591

**d. Balance de energía y masa.**

Se determina la energía necesaria para elevar la temperatura de la leche desde  $T_i$  (inicial) hasta  $T_f$  (final).

$$q = m_F \times C_{pL} \times \Delta T$$

$$q = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3799 \frac{\text{J}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}} \times (62 - 10)^{\circ}\text{C}$$

$$q = 28478\text{ W}$$

El flujo másico del servicio es el mismo que el del fluido debido a que es la misma sustancia.

**e. Cálculo del área total.**

Es necesario asumir un valor del coeficiente total de transmisión de calor para lo cual empezamos con un valor de 5000 W/(m<sup>2</sup>.K), es un valor adecuado para el intercambio entre un sistema agua-agua (PERRY MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO, 1997).

$$A_T = \frac{28478 \text{ W}}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \times 13 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$A_T = 0,438 \text{ m}^2$$

Se procede a realizar el mismo cálculo que en la zona anterior, e iterar usando una hoja de cálculo, modificando  $U_A$  hasta que se cumpla la condición  $U_C=U_A$  o lo que es lo mismo  $U_C/U_A=1,00$  se toma como nuevo valor inicial el valor  $U_C$  y se realiza nuevamente el cálculo. Los resultados se tabulan a continuación.

**Tabla 40. Iteraciones en la zona de regeneración del pasteurizador**

Variable	Unidades	Iteración			
		1	2	.....	5
$U_A$	W/m <sup>2</sup> C	5000	2876	...	1667
$A_T$	m <sup>2</sup>	0,438	0,762	...	1,314
$N_P$	-	15,0	25,0	...	39,0
$N_C$	-	7,0	12,0	...	19,0
$A_f$	m <sup>2</sup>	0,0007	0,0012	...	0,0020
$G_{L1}$	kg/m <sup>2</sup> s	199,71	116,50	...	73,58
$Re_{L1}$	-	753,55	439,57	...	277,63
$Pr_{L1}$	-	11,64	11,64	...	11,64
$Nu_{L1}$	-	68,94	47,27	...	34,27
$h_{L1}$	W/m <sup>2</sup> C	9128,10	6259,25	...	4537,55
$G_{L3}$	kg/m <sup>2</sup> s	199,71	116,50	...	73,58
$Re_{L3}$	-	555,99	324,33	...	204,84
$Pr_{L3}$	-	10,18	10,18	...	10,18
$Nu_{L3}$	-	53,30	36,55	...	26,49
$h_{L3}$	W/m <sup>2</sup> C	7154,87	4906,18	...	3556,67
$U_C$	W/m <sup>2</sup> C	2875,86	2164,54	...	1666,80
$U_A/U_C$	-	1,74	1,33	...	1,00

Una vez que se ha satisfecho la condición de  $U_C=U_A$  se continúa con el cálculo del NTU, eficiencia y la caída de presión en la zona.

*f. Cálculo del número de unidades de transferencia y efectividad.*

$$NTU = \frac{1666,80 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 1,314 m^2}{0,144 \frac{kg}{s} \times 3799 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}$$

$$NTU = 4$$

$$c = \frac{(mC_p)_{\max}}{(mC_p)_{\min}}$$

Debido a que la masa es igual solo se utiliza el Cp

$$c = 0,998$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-4(1-0,99)]}}{1 - 0,99 \times e^{[-4(1-0,99)]}}$$

$$\varepsilon = 0,8 \cong 80\%$$

*g. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.*

De acuerdo a las relaciones de Thonon se usan los parámetros para una placa con un ángulo de corrugación de 30 °.

$$L = \frac{1,314 m^2}{0,0737 m}$$

$$L = 17,84 m$$

- Para la leche fría.

$$f = 0,37 \times 277,63^{-0,172}$$

$$f = 0,14$$

$$\Delta P_F = \frac{0,14 \times 2 \times 18,79 \times 69,90^2}{1031 \times 0,0044}$$

$$\Delta P = 5987 Pa \cong 0,06 Bar$$

- Para la leche caliente.

$$f = 0,37 \times 204,84^{-0,172}$$

$$f = 0,15$$

$$\Delta P_{HW} = \frac{0,15 \times 2 \times 18,79 \times 69,90^2}{1029 \times 0,0044}$$

$$\Delta P_{HW} = 6319 \text{ Pa} \cong 0,06 \text{ Bar}$$

#### 4.5.5. Cálculo para la zona de enfriamiento:

##### a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

$$MLDT = \frac{(23 - 20) - (17 - 15)}{\ln\left(\frac{23 - 20}{17 - 15}\right)}$$

$$MLDT = 3,4$$

##### b. Cálculo de la temperatura media.

$$T_m = \frac{23 + 17}{2}$$

$$T_m = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_m = \frac{15 + 18}{2}$$

$$t_m = 16^\circ\text{C}$$

##### c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.

**Tabla 41. Propiedades fisicoquímicas de la leche a  $T_m=20^\circ\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1036	2,9E-03	3776	0,547

**Tabla 42. Propiedades fisicoquímicas del agua a  $t_m=16^\circ\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
998,1	1,23E-03	4187	0,599

**d. Balance de energía y masa.**

Se determina la energía necesaria para disminuir la temperatura de la leche desde  $T_i$  (inicial) hasta  $T_f$  (final).

$$q = m_{L4} \times C_{pL4} \times \Delta T$$

$$q = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3776 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (23 - 17)^\circ\text{C}$$

$$q = 3266 \text{ W}$$

**e. Cálculo del área total.**

$$A_T = \frac{3266 \text{ W}}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 2,47 ^\circ\text{C}}$$

$$A_T = 0,064 \text{ m}^2$$

Se procede a realizar el mismo cálculo que en la zona anterior, e iterar usando una hoja de cálculo, modificando  $U_A$  hasta que se cumpla la condición  $U_C=U_A$  o lo que es lo mismo  $U_C/U_A=1,00$  se toma como nuevo valor inicial el valor  $U_C$  y se realiza nuevamente el cálculo. Los resultados se tabulan a continuación.

**Tabla 43. Iteraciones en la zona de enfriamiento del pasteurizador**

Variable	Unidades	Iteración	
		1	2
$U_A$	$\text{W/m}^2\text{C}$	5000	4635
$A_T$	$\text{m}^2$	0,193	0,208
$N_P$	-	9,0	9,0
$N_C$	-	4,0	4,0
$A_f$	$\text{m}^2$	0,0004	0,0004
$G_{L4}$	$\text{kg/m}^2\text{s}$	349,50	349,50
$Re_{L4}$	-	1318,72	1318,72
$Pr_{L4}$	-	20,03	20,03
$Nu_{L4}$	-	122,24	122,24
$h_{L4}$	$\text{W/m}^2\text{C}$	15189	15189
$G_{WM}$	$\text{kg/m}^2\text{s}$	699,00	699,00
$Re_{WM}$	-	2435,33	2435,33
$Pr_{WM}$	-	8,86	8,86
$Nu_{WM}$	-	143,12	143,12
$h_{WM}$	$\text{W/m}^2\text{C}$	19407	19407
$U_C$	$\text{W/m}^2\text{C}$	4635	4635
$U_A/U_C$	-	1,08	1,00

Una vez que se ha satisfecho la condición de  $U_C=U_A$  se continúa con el cálculo del NTU, eficiencia y la caída de presión en la zona.

***f. Cálculo del número de unidades de transferencia y efectividad.***

$$NTU = \frac{4747 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 0,208 m^2}{0,144 \frac{kg}{s} \times 3776 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}$$

$$NTU = 2,95$$

$$c = \frac{0,0288 \frac{kg}{s} \times 3776 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}{0,052 \frac{kg}{s} \times 4187 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}$$

$$c = 0,45$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{[-2,95(1-0,45)]}}{1 - 1 \times e^{[-2,95(1-0,45)]}}$$

$$\varepsilon = 0,88 \cong 88\%$$

***g. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.***

De acuerdo a las relaciones de Thonon se usan los parámetros para una placa con un ángulo de corrugación de 30 °.

$$L = \frac{0,068 m^2}{0,0737 m}$$

$$L = 2,83 m$$

- Para la leche.

$$f = 0,37 \times 167,84^{-0,172}$$

$$f = 0,11$$

$$\Delta P_{L4} = \frac{0,15 \times 2 \times 2,83 \times 349,5^2}{1036 \times 0,0044}$$

$$\Delta P_{L4} = 16289 Pa \cong 0,16 Bar$$



- Para el agua fría.

$$f = 0,37 \times 319,41^{-0,172}$$

$$f = 0,08$$

$$\Delta P_{WM} = \frac{0,08 \times 2 \times 2,83 \times 699^2}{998,1 \times 0,001}$$

$$\Delta P_{WM} = 60842 \text{ Pa} \cong 0,61 \text{ Bar}$$

**4.5.6. Cálculo para la zona de retención.** La pasteurización de la leche se basa en la reducción de concentración de un patógeno con:

$$D_{63} = 2,5 \text{ min}$$

Que es el tiempo necesario a 63 °C para que la población de bacterias caiga a un 10 % del inicial.

$$z = 4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Que es incremento en la temperatura para que el valor D, se reduzca a la décima parte del inicial.

**a. Cálculo del tiempo de retención.**

De la ecuación (3)

$$F_{63} = 12 \times 2,5 \text{ min} = 30 \text{ min}$$

Este valor corresponde al tiempo necesario de muerte térmica del microorganismo a temperatura a 63 °C, para encontrar el tiempo necesario a 75 °C se utiliza la ecuación:

De la ecuación (4)

$$F_o = t \times 10^{\frac{T-T_o}{z}}$$

$$F_{75} = F_{63} \times 10^{\frac{T_{63}-T_{75}}{z}}$$

$$F_{75} = 1800 \text{ s} \times 10^{\frac{63-75}{4,3}} = 2,91 \text{ s}$$

$$F_{75} \cong 3 \text{ s}$$

**b. Cálculo de la longitud del tubo de retención.**

Los puertos de entrada y salida para las placas usadas son de 1 de pulgada. Por lo tanto el tubo de retención será fabricado en acero inoxidable AISI 316, que es el indicado para estar en contacto directo con alimentos de este tipo. Se comprobará la velocidad con las velocidades recomendadas en la bibliografía.

**Tabla 44. Diámetro de la tubería de retención**

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro externo (m)	Diámetro interno (m)
1 "	0,0254	0,02415

$$A_f = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (67)$$

En donde:

$A_f$ : Área de flujo.

$D$ : Diámetro interno de la tubería.

$$A_f = \pi \times \frac{(0,02415)^2}{4} = 0,0046 \text{ m}^2$$

El flujo másico a procesar es de 0,144 kg/s, y la densidad de la leche a temperatura de retención es de 1020,15 kg/m<sup>3</sup>, se realiza el cálculo del caudal en esta zona.

$$\varphi = \frac{\dot{m}_F}{\rho_F} \quad (68)$$

En donde:

$\varphi$ : Caudal.

$$\varphi = \frac{0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1020,15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,000141 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se realiza el cálculo de la velocidad promedio:

$$v_{\text{promedio}} = \frac{Q}{A_f} \quad (69)$$

$$v_{\text{promedio}} = \frac{0,000141 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,00046 \text{ m}^2} = 0,31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Debido a que la velocidad de un fluido no es igual en todas las porciones de la tubería se utiliza la velocidad en la porción más veloz que se define como el doble de la velocidad promedio.

$$v_{\text{max}} = 2v_{\text{promedio}} \quad (70)$$

$$v_{\text{max}} = 2 \times 0,31 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Las velocidades obtenidas se encuentran dentro de las recomendadas para líquidos poco viscosos que deben estar en el rango de 0,3-0,9 m/s (McCabe Smith, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Cuarta edición)

De acuerdo a la ecuación del tiempo de residencia se puede calcular la longitud del tramo, además para asegurarnos de que la leche permanezca a la temperatura de esterilización por el tiempo suficiente se agrega un factor de eficiencia que estará entre 0,8 y 0,9 (Tetra Pak), en este caso 0,85.

$$\frac{\theta}{\eta} = \frac{L_R}{v_{\text{max}}} \quad (71)$$

En donde:

$\theta$ : Tiempo de retención.

$L_R$ : Longitud del tubo de retención.

$\eta$ : Factor de eficiencia.

$$L_R = \frac{\theta v_{\text{max}}}{\eta} \quad (72)$$

$$L_R = \frac{3 \text{ s} \times 0,62 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,85} = 2,2 \text{ m}$$

#### 4.6. Diseño del tanque fermentador R-200.

Antes de realizar el cálculo del pre calentador, se necesita calcular la temperatura de alimentación de la leche pasteurizada, por lo que este cálculo se realizará después de obtener la temperatura de alimentación de la corriente Y1 al fermentador R-200, es decir la temperatura de salida del pre-calentador. El volumen total a procesar se calcula con la sumatoria de masas y la densidad

**Tabla 45. Masa de materia prima introducida en el fermentador**

Corriente	Nomenclatura	Masa [kg]
Leche	L6	103,8
Azúcar	A	10,38
Cultivo Liofilizado	C	0,0014
Estabilizante	E	2,076
Saborizante y colorante	F	1,038
<b>Total</b>	-	117,30

$$\rho_T(43^\circ\text{C}) = 1,105 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$$

Por lo tanto el volumen a tratar es:

$$V_{Y1} = \frac{m_T}{\rho_T} \quad (73)$$

$$V_{Y1} = \frac{117,30 \text{ kg}}{1,105 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 106,15 \text{ L}$$

**4.6.1. Volumen del tanque R-200.** Se realiza un cálculo similar al del tanque de balance V-120, pero con la capacidad total del lote de yogur

$$V_{R-200} = V_{Y1} + V_{\text{HOLGURA}}$$

$$V_{\text{HOLGURA}} = F_s \times V_L$$

En donde:

$V_{Y1}$ : Volumen del yogur.

**Tabla 46. Variables en el diseño del tanque R-200**

VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDAD	VALOR
$V_F$	Volumen de leche para balance	L/h	106,15
$F_s$	Factor de seguridad	-	0,2
$V_{\text{HOLGURA}}$	Volumen de holgura	Litros	21,23
$V_{V-120}$	Volumen del fermentador R-200	Litros	127,40

#### 4.6.2. Dimensiones del tanque fermentador R-200.

$$V_{\text{CILINDRO}} = \pi \times \frac{D^2}{4} \times H$$

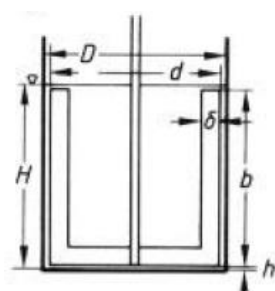
$$D = H$$

Se asume un valor del diámetro y se itera hasta conseguir un valor igual al del volumen del tanque con un error de  $\pm 1$  L.

**Tabla 47. Iteraciones del diámetro del tanque R-200**

ITERACIÓN		1	2	3
Diámetro del cilindro	D, [m]	0,600	0,500	0,550
Altura del cilindro	H, [m]	0,600	0,500	0,550
$V_{\text{TOTAL}}$	[L]	169,65	98,17	130,67

4.6.3. **Potencia del agitador del fermentador R-200.** Para la agitación del silo se ha escogido un agitador de tipo turbina de 6 aspas, el cual tiene las siguientes relaciones geométricas:



Anchor  
 $D/d=1.02$   
 $h/d=0.01$   
 $b/d=1.00$   
 $\delta/d=0.10$

**Figura 42. Relaciones geométricas para un agitador de ancla**

**Fuente:** ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMESTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010, Capitulo de agitación, p.7, Figura 8.

Se realiza el cálculo de las dimensiones del agitador de acuerdo a las relaciones encontradas en la bibliografía consultada.

Las dimensiones del agitador son las siguientes:

**Tabla 48. Dimensiones del agitador del fermentador R-200**

AGITADOR		Unidades
D	0,539	m
h	0,005	m
δ	0,054	m

Se realiza el cálculo del número de Reynolds, teniendo en cuenta que la agitación se realiza a bajas velocidades, seleccionamos una velocidad de 50 RPM.

De la ecuación (47)

$$Re = \frac{0,833 \text{ s}^{-1} \times (0,539 \text{ m})^2 \times 1105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0708 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 3,87 \times 10^3$$

Se obtiene un número de Reynolds que corresponde a régimen de transición, para calcular la potencia usamos la carta que correlaciona el número de potencia y el número de Reynolds.

Se calcula la potencia del agitador con la ecuación (48):

Se obtiene con el número de Reynolds y la curva (d) un  $N_p = 0,9$ . El trazado se encuentra en el ANEXO J.

$$P = 0,9 \times (0,833 \text{ s}^{-1})^3 \times (0,539 \text{ m})^5 \times 1105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 25 \text{ W}$$

$$P = 25 \text{ W}$$

Por lo tanto se necesita un motor de 25 W o mayor para agitar el coágulo.

#### **4.6.4. Masa del fermentador R-200:**

$$m_{R-200} = V_{\text{acero}} \times \rho_{\text{acero inoxidable 316}} \quad (74)$$

$$V_{\text{acero}} = V_{\text{externo}} - V_{\text{interno}} + V_{\text{BASE}} + V_{\text{TAPA}} \quad (75)$$

Se asume que el recipiente será un cilindro perfecto, la tapa y el fondo se calculan como cilindros pequeños, de altura igual al espesor de las paredes.

$$V_{\text{externo}} = \pi \times \frac{DE^2}{4} \times H \quad (76)$$

$$V_{\text{interno}} = \pi \times \frac{DI^2}{4} \times H \quad (77)$$

$$V_{TAPA} + V_{BASE} = 2 \times \pi \times \frac{DE^2}{4} \times e_{V-110} \quad (78)$$

**Tabla 49. Propiedades del acero inoxidable AISI 316**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$\rho$	Densidad	7,96	( g cm <sup>-3</sup> )
$C_p$	Calor específico	502	J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )
$k$	Conductividad térmica	16,3	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica	16-18	(x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )

**Fuente:** GODFELLOW, Materiales de investigación, Huntingdon, 2014. [Fecha de consulta: 2 de Julio 2014]. Disponible en: <<http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>>

**Tabla 50. Masa de la marmita**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$V_{\text{externo}}$	Volumen externo R-200	0,132	m <sup>3</sup>
$V_{\text{interno}}$	Volumen interno R-200	0,131	m <sup>3</sup>
$V_{TAPA}$	Volumen tapa	0,001	m <sup>3</sup>
$V_{BASE}$	Volumen base	0,001	m <sup>3</sup>
$V_{\text{acero}}$	Volumen del acero de R-200	0,003	m <sup>3</sup>
$m_{R-200}$	Masa del fermentador R-200	22,72	kg

- En un principio el fermentador realiza la función de tanque contenedor de la materia prima mientras se dan las reacciones, debido a que la reacción se da en un rango de temperaturas entre 45 y 43 °C se realizará el cálculo de las pérdidas de calor al ambiente para conocer la cantidad de energía que se debe reponer al sistema para que se dé la reacción.
- Se realizará el cálculo con el recipiente sin aislamiento para luego determinar el espesor del aislante, y si se requiere o no energía externa para mantener la temperatura del fermentador.
- Se considera también el calor necesario para calentar la marmita desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación.

#### **4.6.5. Balance de energía.**

##### **4.6.5.1. Cálculo del calor necesario para calentar el fermentador.**

No se considera la masa del agitador ya que su masa es despreciable.

$$Q_{R-200} = m_{R-200} \times C_{P(\text{acero})} \times \Delta T \quad (79)$$

Se toma la temperatura ambiente promedio en Quito de 15 °C, la temperatura a la que se quiere llegar es de 45 °C

$$Q_{R-200} = 22,72 \text{ kg} \times 502 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \times (45 - 15)^\circ\text{C}$$

$$Q_{R-200} = 342163 \text{ J}$$

Para reponer este calor es necesario precalentar la mezcla a una temperatura superior a la temperatura de operación, por lo que se calcula la variación de temperatura de la corriente para compensar esta pérdida de calor.

**Tabla 51. Propiedades de la corriente Y1**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$m$	Masa	117,3	kg
$\rho$	Densidad	1,105	$\text{g cm}^{-3}$
$C_P$	Calor específico	3780	$\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$

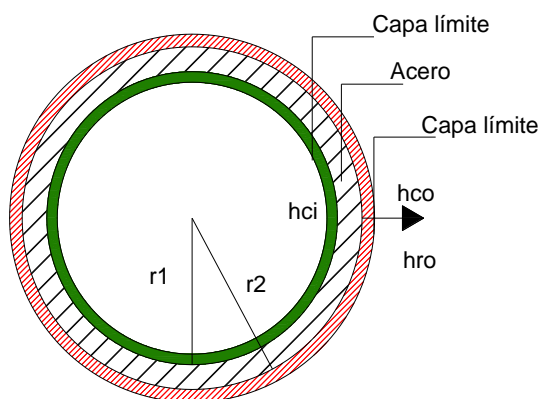
$$Q_{R-200} = 723784 \text{ J} = m_{Y1} \times C_{PY1} \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{723784 \text{ J}}{m_{Y1} \times C_{PY1}}$$

$$\Delta T = 0,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se ha calculado una pérdida de 1°C, por seguridad se incrementará un grado centígrado por lo que la leche se alimentará a 47 °C

#### 4.6.5.2. Cálculo del calor perdido por las paredes del fermentador



**Figura 43. Flujo de calor en el fermentador R-200**



Se calculará el calor perdido por las 3 formas de transferencia de calor, conducción convección y radiación tomando en cuenta la siguiente ecuación.

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_{ci}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_{acero}} + \frac{1}{2\pi r_2 L (h_{co} + h_{ro})}} \quad (80)$$

En donde:

Ti: Temperatura interna.

To: Temperatura externa.

**a. Cálculo del coeficiente de convección interno,  $h_{ci}$ .**

Se tomarán las siguientes consideraciones:

- El recipiente en esta etapa no tiene agitación debido a que aún no se ha formado el coágulo, por lo que se calcula como convección natural.
- Las propiedades físicas no cambian en todo el proceso, debido a que la temperatura permanece constante.

Para los cálculos se toman los datos de la leche a la temperatura de película, 45 °C.

Para convección natural en cilindros verticales:

$$Nu = c(GrPr)^m \quad (81)$$

En donde:

c y m: parámetros de la ecuación de convección natural que dependen del régimen de flujo.

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (82)$$

L: Altura del cilindro.

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica.

g: Gravedad

La mayor parte de yogur es agua, por lo tanto se asume  $\beta$  como el del agua.

$$\beta = 0,21 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Como la viscosidad es una propiedad que cambia con el tiempo debido a que la proteína se desnaturaliza formando coágulos se tomará una media entre la leche y el yogur, siendo este valor aproximadamente 0,035 Pa.s.

**Tabla 52. Datos para el cálculo del coeficiente de convección interno,  $h_{ci}$**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$\rho$	Densidad	1105	(kg m <sup>-3</sup> )
$\mu$	Viscosidad	0,035	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
$g$	Gravedad	9,81	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\beta$	Coeficiente de expansión volumétrica	0,21	°C <sup>-1</sup>
L	Altura del cilindro	0,55	m
Pr	Numero de Prandlt	7,51	-

$$Gr = 1,2 \times 10^7$$

Para determinar los parámetros necesarios para la ecuación nos basamos en el ANEXO K del presente trabajo (Paul Singh).

$$GrPr = 8,98 \times 10^7$$

De este modo la ecuación para el cálculo de h es:

$$h = \frac{k}{D} 0,59 (GrPr)^{\frac{1}{4}} \quad (83)$$

$$h_{ci} = 58,48 \frac{W}{m^2 \text{°C}}$$

**b. Cálculo del coeficiente de convección,  $h_{co}$ .**

Se tomarán las siguientes consideraciones:

- Las propiedades físicas no cambian en todo el proceso, debido a que la temperatura permanece constante.
- Temperatura ambiente de 15 °C.
- El régimen es laminar en bajas temperaturas.

Para convección natural del aire en cilindros verticales en régimen laminar:

$$h = 1,42 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (84)$$

En donde:

$L$ : Altura del cilindro.

$\Delta T$ : Variación de la temperatura entre la pared del fermentador y el ambiente  $\Delta T = T - T_a$

$$h_{co} = 1,42 \left( \frac{45^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}}{0,55\text{m}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$h_{co} = 1,59 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

*c. Cálculo del coeficiente de radiación,  $h_{ro}$ .*

$$h_{ro} = \varepsilon \times 5,67 \times \left( \frac{T_p^4}{100} - \frac{T_a^4}{100} \right) \quad (85)$$

En donde:

$\varepsilon$ : Emisividad del material

$\sigma$ : Constante de Boltzman

**Tabla 53. Datos para el cálculo del coeficiente de radiación,  $h_{ro}$**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$\varepsilon$	Emisividad del acero inoxidable 316	0,28	(kg m <sup>-3</sup> )
$T_p$	Temperatura del acero en la pared	317	K
$T_a$	Temperatura ambiente	288	K

$$h_{ro} = 5,47 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

**Tabla 54. Datos para el cálculo del flujo de calor**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$h_{ci}$	Coeficiente de convección interno	35,6	W/m <sup>2</sup> K
$h_{co}$	Coeficiente de convección externo	3,51	W/m <sup>2</sup> K
$h_{ro}$	Coeficiente de radiación	5,47	W/m <sup>2</sup> K
$k_{acero}$	Conductividad térmica del acero	16,3	W/mK
$L$	Longitud del fermentador	0,55	m
$r_1$	Radio interno del fermentador	0,55	m
$r_2$	Radio externo del fermentador	0,573	m
$T_i$	Temperatura interior	45	C
$T_o$	Temperatura exterior	15	C

Reemplazando los valores en la ecuación de flujo de calor:

$$q = 445 \text{ W}$$

La fermentación se da en un tiempo de 5 horas y media como valor promedio, por lo tanto el flujo total de calor es:

$$Q = 445 \frac{\text{W}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} \times 5,5 \text{ horas}$$

$$Q = 8828265 \text{ J}$$

El cuál es el calor perdido por la corriente Y1 en el tiempo que dura la fermentación, se realiza un balance de energía para encontrar la variación de temperatura.

Debido a que el fluido está compuesto en su gran mayoría por leche y esta no cambia sus propiedades hasta pasadas 4 horas y media, se tomará su capacidad calórica a la temperatura de operación.

$$Q = 8828265 \text{ J} = m_{Y1} \times C_{PY1} \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{8828265 \text{ J}}{m_{Y1} \times C_{PY1}}$$

$$\Delta T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

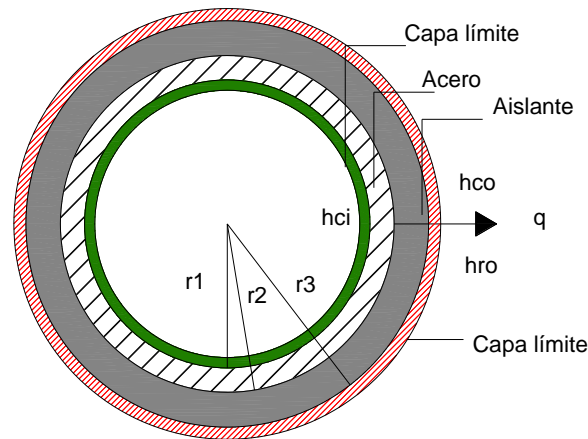
Existe una gran disminución de temperatura si se deja el tanque expuesto al ambiente, por lo que es necesario recubrirlo con un aislante para evitar el uso de una chaqueta de calentamiento y reducir los costos, se usará espuma de poliuretano por su baja conductividad térmica.

#### 4.6.5.3. Cálculo del calor perdido por las paredes del fermentador con un aislante térmico.

Se calcula nuevamente el flujo de calor seleccionando un material aislante para evitar el flujo de calor a través de las paredes del fermentador, se ha seleccionado la espuma de poliuretano por su costo moderado y su baja conductividad térmica con un espesor de 2 cm.

**Tabla 55. Propiedades térmicas del poliuretano**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
$k_{\text{aislante}}$	Conductividad térmica de la espuma de poliuretano	0,023	W/mK
$\varepsilon$	Emisividad del poliuretano	0,9	(kg m <sup>-3</sup> )
e	Espesor del poliuretano	0,02	m



**Figura 44. Flujo de calor en el fermentador R-200 con aislamiento**

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_{ci}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_{acero}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_{aislante}} + \frac{1}{2\pi r_2 L (h_{co} + h_{ro})}} \quad (86)$$

Debido a que la temperatura externa en la pared del aislante, es diferente a la temperatura externa del acero, se recalculan los coeficientes de convección y radiación.

Se realizará el cálculo por tanteo asumiendo una temperatura en la cara externa del material aislante y con esta temperatura se calculará la cantidad de calor transmitido a su través, que ha de ser igual a la cantidad de calor transmitida por radiación y convección, si la temperatura asumida es la correcta.

$$q = q_{\text{conducción}} = q_{\text{(convección+radiación)}} \quad (87)$$

$$q = \frac{T_i - T_{\text{aislante}}}{\frac{e_{\text{aislante}}}{A_{\text{aislante}} \times k_{\text{aislante}}}} = \frac{T_{\text{aislante}} - T_o}{\frac{1}{A_{\text{externa}}(h_{co} + h_{ro})}} \quad (88)$$

**Tabla 56. Datos para el cálculo de los coeficientes de convección y radiación**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
A <sub>aislante</sub>	Área del aislante	2,765	m
A <sub>externa</sub>	Área de la cara externa	2,780	m

Primera iteración:

$$T_{\text{aislante}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_{co} = 2,67 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_{ro} = 5,13 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$q_{conducción} = 94 \text{ W}$$

$$q_{(convección+radiación)} = 897,6 \text{ W}$$

La temperatura asumida ha sido demasiado alta, se asume una temperatura más baja.

Segunda iteración:

$$T_{\text{aislante}} = 17 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{co} = 1,79 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_{ro} = 4,92 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$q_{conducción} = 131 \text{ W}$$

$$q_{(convección+radiación)} = 154,3 \text{ W}$$

La temperatura asumida ha sido demasiado alta, se asume una temperatura más baja.

Tercera iteración:

$$T_{\text{aislante}} = 16,75 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{co} = 1,6 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_{ro} = 4,9 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$q_{conducción} = 132,8 \text{ W}$$

$$q_{(convección+radiación)} = 132,9 \text{ W}$$

A esta temperatura los valores son iguales, por lo que se selecciona estos coeficientes de convección y radiación.

**Tabla 57. Datos para el cálculo del flujo de calor**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
h <sub>ci</sub>	Coeficiente de convección interno	58,6	W/m <sup>2</sup> K
h <sub>co</sub>	Coeficiente de convección externo	1,6	W/m <sup>2</sup> K
h <sub>ro</sub>	Coeficiente de radiación	4,9	W/m <sup>2</sup> K
k <sub>acero</sub>	Conductividad térmica del acero	16,3	W/mK
k <sub>aislante</sub>	Conductividad térmica del poliuretano	0,023	W/mK
L	Longitud del fermentador	055	m
r <sub>1</sub>	Radio interno del fermentador	0,55	m
r <sub>2</sub>	Radio externo del fermentador	0,553	m
r <sub>3</sub>	Radio externo del aislante	0,573	m
T <sub>i</sub>	Radio externo del fermentador	45	C
T <sub>o</sub>	Temperatura exterior	15	C

Reemplazando los valores en la ecuación de flujo de calor:

$$q = 137 \text{ W}$$

La fermentación se da en un tiempo de 5 horas y media como valor promedio, sin embargo el coagulo se forma a las 4 horas de operación por lo tanto el flujo total de calor es:

$$Q = 137 \frac{\text{W}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} \times 4 \text{ horas}$$

$$Q = 1979623 \text{ J}$$

El cuál es el calor perdido por la corriente Y1 hasta que se forme el coágulo incluyendo un aislante térmico, los datos de calor específico y masa están tabulados en la Tabla 56.

$$Q = 1979623 \text{ J} = m_{Y1} \times C_{PY1} \times \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{1979623 \text{ J}}{m_{Y1} \times C_{PY1}}$$

$$\Delta T = 4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Es una diferencia aceptable por lo que se decide no incluir una chaqueta de calentamiento, en la industria alimenticia es común recubrir este equipo con aislamiento térmico para reducir costos de operación.

#### 4.7. Diseño del pre calentador E-210 y el enfriador E-220.

Para los intercambiadores se ha tomado las siguientes consideraciones:

- Se diseñaran intercambiadores de tubo concéntrico en los dos casos.
- De acuerdo al cálculo realizado en el punto 4.6.4.1, en el cual se obtuvo una disminución de 2 °C en la temperatura de la leche para llevar el recipiente desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación por lo tanto la mezcla se debe calentar de 17°C hasta 47°C.
- La leche pasteurizada se calentará con el agua proveniente de la zona de calentamiento del pasteurizador, la cual está a una temperatura de 74 °C y su flujo másico es el doble que el de la leche.
- El yogur se enfriará con el agua proveniente del municipio en una relación de 2,5 veces el flujo de yogur.
- De acuerdo al cálculo realizado en el punto 4.6.4.3, en el cual se obtuvo una disminución de 4,3 °C en la temperatura de la leche para llevar el recipiente desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de operación por lo tanto la mezcla se debe calentar de 40°C hasta 20°C.
- Para el cálculo del enfriador se usarán las propiedades térmicas de la leche como las de yogur, asumiendo que no hay un cambio significativo debido a que no se ha añadido más grasa ni agua.

En base a estas consideraciones se han calculado las temperaturas de salida de los fluidos de calentamiento y enfriamiento.

**Tabla 58. Temperaturas a la entrada y salida del pre calentador y enfriador.**

ZONA	Leche		Fluido de servicio	T Entrada	T Salida
	T Entrada	T Salida			
<b>Pre calentador</b>	17	47	<i>Agua caliente</i>	74	61
<b>Enfriador</b>	40	20	<i>Agua fría</i>	15	22

Es necesario conocer las dimensiones de los tubos para el dimensionamiento del intercambiador de tubo concéntrico, por lo cual se ha seleccionado un intercambiador con las características detalladas en la tabla 59.



**Tabla 59. Dimensiones de la tubería.**

Variable	Tubo externo	Tubo interno
Diámetro nominal	1 1/2"	1"
Diámetro interno (m)	0,0355	0,0229
Diámetro externo (m)	0,0381	0,0254
Longitud (m)	3	
Área de transferencia de calor (m)	0,120	

Con las ecuaciones (30), (31) y (32) se ha obtenido el diámetro equivalente y las áreas de flujo para cada tubo como se indica en la tabla 59.

**Tabla 60. Áreas de flujo y diámetro equivalente del intercambiador E-210 y E-220.**

Variable	Interno	Ánulo
Área de flujo (m)	0,0004	0,0049
Diámetro equivalente	0,024	

#### 4.7.1. Diseño del pre calentador E-210.

##### a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

De la ecuación (5)

$$MLDT = \frac{(74 - 47) - (61 - 17)}{\ln \left( \frac{(74 - 47)}{(61 - 17)} \right)}$$

$$MLDT = 34,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

##### b. Cálculo de la temperatura media y de pared.

De las ecuaciones (6) y (7)

$$T_m = \frac{17 + 47}{2}$$

$$T_m = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_m = \frac{74 + 61}{2}$$

$$t_m = 67 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

*c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.*

**Tabla 61. Propiedades fisicoquímicas de la leche a Tm=32 °C**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1034	2,25E-03	3788	0,566

**Tabla 62. Propiedades fisicoquímicas del agua a tm=67 °C**

Densidad	Viscosidad	Cp	K
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
979,6	5,87E-04	4218	0,597

*d. Balance de energía.*

De la ecuación (8).

$$q = \dot{m}_{L5} \times C_{pL5} \times \Delta T$$

$$q = 0,144 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3788 \frac{\text{J}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}} \times (47 - 17)^{\circ}\text{C}$$

$$q = 16382 \text{ W}$$

*e. Cálculo del flujo másico por unidad de área*

De la ecuación (14).

El caudal de trabajo será el mismo que el del pasteurizador debido a que es el proceso que continua a la pasteurización y no se puede disminuir en este punto.

- Para la leche  $\phi = 500 \text{ L/h}$ .

$$G_{L5} = 349,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

- Para el agua.  $\phi = 1000 \text{ L/h}$

$$G_{HW} = 592,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

**f. Determinación de los coeficientes de transmisión de calor.**

**Tabla 63. Cálculo de números adimensionales pre-calentador E-210.**

TUBO INTERIOR	ÁNULO
De las ecuaciones (19) y (20). $Re_{L5} = 3557,7$ $Pr_{L5} = 15,1$	De las ecuaciones (19) y (20). $Re_{HW} = 26462$ $Pr_{HW} = 3,7$
De la ecuación (33) $Nu_{L5} = 0,023 Re^x Pr^{0,8}$ $x = 0,3$ para enfriamiento $Nu_{L5} = 35,98$	De la ecuación (34) $Nu_{HW} = 0,023 Re^{2/3} Pr^{0,14} \left(\frac{Di}{di}\right)^{0,45}$ $Nu_{HW} = 28,5$
De la ecuación (21). $h_{L5} = h_i = 889,36 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	De la ecuación (21). $h_{HW} = h_o = 786,36 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Corrección del  $h_i$ , de la ecuación (36):

$$h_{io} = 802,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**g. Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor:**

De la ecuación (37):

$$\frac{1}{U_c} = \frac{h_{HW} \times h_{io}}{h_{HW} + h_{io}}$$

$$U_c = 397,1 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

De la ecuación (38):

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{397,1} + 8 \times 10^{-5}$$

$$U_D = 384,87 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

**h. Cálculo del área del equipo.**

De la ecuación (12).

$$A_T = \frac{16382 \text{ W}}{384,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \times 34,7^\circ\text{C}}$$

$$A_T = 1,22 \text{ m}^2$$

*i. Cálculo del número de tubos y horquillas.*

De la ecuación (39).

$$N_t = \frac{2,85 \text{ m}^2}{0,12 \text{ m} \times 3 \text{ m}}$$

$$N_t = 4$$

De la ecuación (40).

$$N_h = \frac{4}{2}$$

$$N_h = 2$$

*j. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.*

**Tabla 64. Pérdida de carga pre-calentador E-210**

TUBO INTERIOR	ÁNULO
Para régimen laminar, de la ecuación (44). $f = 0,004$	Para régimen turbulento, De la ecuación (45). $f = 0,0388$
De la ecuación (42). $\Delta P_f = 557,4 \text{ Pa}$	De la ecuación (42). $\Delta P_f = 14444 \text{ Pa}$
De la ecuación (43). $\Delta P_g = 709,88 \text{ Pa}$	De la ecuación (43). $\Delta P_g = 9640 \text{ Pa}$
De la ecuación (41). $\Delta P_T = 1267 \text{ Pa} \cong 0,013 \text{ Bar}$	De la ecuación (41). $\Delta P_T = 24284 \text{ Pa} \cong 0,24$

**4.7.2. Diseño del enfriador E-220.**

*a. Cálculo de la diferencia de temperaturas media logarítmica.*

De la ecuación (5)

$$MLDT = \frac{(40 - 22) - (20 - 15)}{\ln\left(\frac{(40 - 22)}{(20 - 15)}\right)}$$

$$MLDT = 34,7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

**b. Cálculo de la temperatura media y de pared.**

De las ecuaciones (6) y (7)

$$T_m = \frac{40 + 20}{2}$$

$$T_m = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_m = \frac{15 + 22}{2}$$

$$t_m = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$$

**c. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos.**

**Tabla 65. Propiedades fisicoquímicas del yogur a  $T_m = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	k
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
1114	1,22E-01	3786	0,563

**Tabla 66. Propiedades fisicoquímicas del agua a  $t_m = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Densidad	Viscosidad	Cp	K
kg/m <sup>3</sup>	kg/m.s	J/kg.C	w/m.C
997,9	1,21E-03	4186	0,600

**d. Balance de energía.**

De la ecuación (8).

$$q = \dot{m}_{Y2} \times C_{pL5} \times \Delta T$$

$$q = 0,033 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3786 \frac{\text{J}}{\text{kg.}^{\circ}\text{C}} \times (40 - 20)^{\circ}\text{C}$$

$$q = 2499\text{ W}$$

**e. Cálculo del flujo másico por unidad de área**

Se ha considerado un caudal de 100 L/h a la salida del fermentador ya que la viscosidad se ha incrementado y es necesario utilizar una bomba de desplazamiento positivo, en el mercado

se encuentran bombas con bajos caudales a precios económicos, se debe tomar en cuenta que la siguiente etapa es el envasado por lo que se debe buscar bajos caudales para poder utilizar una maquina semi-automática o una manual.

De la ecuación (14).

- Para el yogur  $\phi = 100$  L/h.

$$G_{Y2} = 80,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

- Para el agua  $\phi = 250$  L/h.

$$G_{HW} = 169,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

**f. Determinación de los coeficientes de transmisión de calor.**

**Tabla 67. Cálculo de números adimensionales enfriador E-220**

TUBO INTERIOR	ÁNULO
De las ecuaciones (19) y (20). $Re_{Y2} = 15,0$ $Pr_{Y2} = 820,0$	De las ecuaciones (19) y (20). $Re_{HW} = 3415$ $Pr_{HW} = 8,4$
De la ecuación (33) $Nu_{Y2} = 0,23 Re_{Y2}^{0,8} Pr_{Y2}^x$ $x = 0,3$ Para enfriamiento. $Nu_{Y2} = 2,94$	De la ecuación (34) $Nu_{HW} = 0,023 Re^{2/3} Pr^{0,14} \left(\frac{Di}{di}\right)^{0,45}$ $Nu_{HW} = 8,6$
De la ecuación (21). $h_{Y2} = h_i = 72,36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	De la ecuación (21). $h_{HW} = h_o = 210,88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

Corrección del  $h_i$ , de la ecuación (36):

$$h_{io} = 65,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

**g. Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor:**

De la ecuación (37):

$$U_C = 49,84 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

De la ecuación (38):

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{49,84} + 8 \times 10^{-5}$$

$$U_D = 49,65 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

***h. Cálculo del área del equipo.***

De la ecuación (12).

$$A_T = \frac{3273}{121 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 34,7^\circ C}$$

$$A_T = 4,99 m^2$$

***i. Cálculo del número de tubos y horquillas.***

De la ecuación (39).

$$N_t = \frac{4,99 m^2}{0,12m \times 3m}$$

$$N_t = 14$$

De la ecuación (40).

$$N_h = \frac{14}{2}$$

$$N_h = 7$$

**j. Cálculo de la pérdida de carga en el equipo.**

**Tabla 68. Pérdida de carga enfriador E-220**

TUBO INTERIOR	ÁNULO
Para régimen laminar, de la ecuación (44). $f = 1,064$	Para régimen turbulento, de la ecuación (45). $f = 0,0437$
De la ecuación (42). $\Delta P_f = 22446 \text{ Pa}$	De la ecuación (42). $\Delta P_f = 4839 \text{ Pa}$
De la ecuación (43). $\Delta P_g = 150 \text{ Pa}$	De la ecuación (43). $\Delta P_g = 836 \text{ Pa}$
De la ecuación (41). $\Delta P_T = 22595 \text{ Pa}$	De la ecuación (41). $\Delta P_T = 5675 \text{ Pa}$

**4.8. Equipos y recipientes adicionales.**

Se necesitan los siguientes depósitos de almacenamiento y equipos adicionales para la instalación de la planta:

**4.8.1. Tanques para agua fría.** Se puede obtener del servicio municipal de agua potable y se debe almacenar en un depósito, para que la bomba pueda funcionar correctamente. Se requieren alrededor de 200 litros de agua para tratar la etapa de enfriamiento del pasteurizador y 250 litros para enfriar el yogur. Para esto se proponen 2 tanques cónicos de polietileno, su capacidad nominal en el mercado es de 250 L como se observa en la figura 45.





**Figura 45. Especificaciones de los tanques de polietileno**

**4.8.2. Calentador de Agua E-110.** Se requiere un calentador de agua eléctrico o a gas con capacidad para el calentamiento de 200 litros de agua. El agua será utilizada en la zona de calentamiento del pasteurizador y a su salida se aprovechará su energía en el precalentamiento de la leche antes de entrar al fermentador.

**4.8.3. Mezclador estático M-210.** Este equipo se utiliza principalmente en la homogeneización y dispersión de gases y líquidos sin la utilización de partes móviles para su funcionamiento. El mezclador estático es un tubo cilíndrico en cuyo interior está insertado un eje removible con deflectores a modo de hélices que dividen el flujo y crean un movimiento de rotación y cambios de dirección dentro del mezclador. Se puede seleccionar de acuerdo al tamaño de la tubería y no representa consumo de energía.

**4.8.4. Envasadora PK-210.** Se debe adquirir una envasadora con capacidad para 100 L/h, ya sea para envases o fundas.

**4.8.5. Cámara de refrigeración o cuarto frío CR-210.** La temperatura que se logra alcanzar en el intercambiador es de apenas 20 °C, se requiere mantener el producto final a una temperatura de 4 °C por lo que se debe adquirir una cámara de refrigeración con capacidad para 100 L de producto con temperatura inicial de 20 °C.

#### 4.9. Cálculo de bombas.

No se considerarán pérdidas por fricción en tuberías y accesorios, debido a que son ínfimas en tramos pequeños por lo cual solo se considerará la pérdida de carga en intercambiadores de calor, es necesario un diagrama isométrico para establecer las alturas estáticas de cada tramo del proceso.

**4.9.1. Cálculo modelo para la BOMBA P-111.** Esta bomba será usada para transportar la leche desde el tanque de recepción a través del pasteurizador y el pre-calentador hasta el fermentador.

##### CAUDAL:

El caudal de trabajo es de 500 L/h para la sección de pasteurización,

##### PRESIÓN DE TRABAJO:

La presión debido a pérdidas por fricción en el pasteurizador es de 0,51 bars, sumando las zonas de regeneración, calentamiento, enfriamiento y precalentamiento.

##### CNPA DISPONIBLE:

Se calcula el CNPA disponible de acuerdo con la ecuación (53):

$$\text{CNPA}_D = Z_s + \frac{P_d - P_v}{\rho g} - h_{fs}$$

Se tomará la presión de vapor del agua a 10 °C:

$$P_v = 1176 \text{ Pa}$$

La presión de descarga es igual a la presión atmosférica en quito:

$$P_d = 72260 \text{ Pa}$$

$$\text{CNPA}_D = 1,44 \text{ m} + \frac{(72260 - 1176) \text{ Pa}}{1038 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$
$$\text{CNPA}_D = 8,42 \text{ m}$$

**Tabla 69. Datos de alturas de succión y descarga del fluido en cada bomba**

BOMBA	P-111	P-112	P-113	P-114
Zs (m)	1,44	0,71	0,71	0,71
Zd (m)	0,45	0,45	0,45	0,68

- Nota: Se ha agregado a los tanques una altura de 50 cm, que es la altura de los soportes.
- Nota: El sistema está basado en las alturas de los depósitos de agua ubicados al mismo nivel que las bombas, sin embargo en el caso de la bomba P-113 se debe procurar elevar el depósito de agua según requiera la bomba por la elevada caída de presión que se tiene en la zona de calentamiento.

#### 4.10. Estimación del costo de la planta.

Para la estimación del costo se ha consultado a varias empresas tanto locales como extranjeras obteniendo los siguientes costos promedio de cada equipo, los cuales se muestran en la tabla 70.

**Tabla 70. Estimación de costos equipos principales**

Equipo	Capacidad	Material	Tipo de equipo	Cantidad	Costo (\$)
Silo	100 L	Acero inoxidable AISI 316	Recipiente con control de nivel	1	1000,00
Pasteurizador	500 L/h	Acero inoxidable AISI 316	Intercambiador de calor con control automático y tanque de balance, incluye todos los accesorios	1	15000,00
Fermentador	120 L	Acero inoxidable AISI 316	Marmita con aislante térmico y control de temperatura	1	2000,00
Pre calentador	500 L/h	Acero inoxidable AISI 316	Intercambiador de calor de 2 horquillas, tubería de 3m de largo, Diámetro interno de la tubería 1', Diámetro del ánulo 1 1/4'	1	900,00
Enfriador	100 L/h	Acero inoxidable AISI 316	Intercambiador de calor de 7 horquillas, tubería de 3m de largo, Diámetro interno de la tubería 1', Diámetro del ánulo 1 1/4'	1	3500,00
Mezclador	---	Acero inoxidable AISI 316	Tramo de tubería con generador de turbulencia	1	300,00
Envasadora	100 L/h	----	Equipo de llenado con flujo constante	1	700,00
Cámara de enfriamiento	120 L	---	Equipo refrigerador	1	1200,00
<b>TOTAL</b>					<b>24600,00</b>

Es necesario dar un valor estimado de equipos, recipientes y accesorios adicionales al valor de los equipos principales para la implementación de la planta, los cuales se detallan en la tabla 71.

**Tabla 71. Estimación de costos equipos auxiliares y accesorios**

<b>Equipo</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo Total (\$)</b>
Depósitos de almacenamiento	100 L	2	180,00	360,00
Bomba Centrifuga Sanitaria	500 L/h	1	750,00	750,00
Válvula de desviación 3 vías	---	1	250	250,00
Válvula de mariposa, sanitaria	---	2	75	150,00
Bomba centrifuga	1000 L/h	3	150	450,00
Bomba centrifuga	250 L/h	1	75	75,00
Bomba de rotor lobulado sanitaria	100 L/h	1	100	100,00
Tuberías de acero inoxidable	1'	2	78	156,00
Tuberías de PVC	1'	3	28	84,00
Accesorios Adicionales	---		500	500,00
<b>TOTAL</b>				<b>2875,00</b>

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Dimensiones del tanque de almacenamiento V-110.

**Tabla 72. Dimensiones del tanque V-110**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
D <sub>V-110</sub>	Diámetro del tanque V-110	0,600	m
H <sub>V-110</sub>	Altura del tanque V-110	0,900	m
h <sub>V-110</sub>	Altura de la base del tanque V-110	0,150	m
d <sub>V-110</sub>	Diámetro de la boquilla de salida del tanque V-110	½"	m
e <sub>V-110</sub>	Espesor del tanque	3	mm
V <sub>V-110</sub>	Volumen Total del tanque V-110	120,16	L

**Tabla 73. Especificaciones del agitador del tanque V-110**

Especificación	Descripción
Tipo de agitador	Turbina de 6 aspas
Diámetro del agitador	0,18 m
Altura a la que se ubica el agitador	0,18 m
Velocidad de agitación	120 RPM
Potencia del agitador	8 W
Tiempo de agitación	50 segundos.

### 5.2. Dimensiones del tanque de balance V-120.

**Tabla 74. Dimensiones del tanque V-120**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
D <sub>V-120</sub>	Diámetro interno del tanque V-120	0,29	m
H <sub>V-120</sub>	Altura del tanque V-120	0,435	m
e <sub>V-120</sub>	Espesor del tanque V-120	3	mm
V <sub>V-120</sub>	Volumen Total del tanque V-120	24,77	L

**Nota:** El tanque debe estar equipado con una boya de nivel para asegurar que la altura se mantenga constante.

### 5.3. Especificación de la tubería.

**Tabla 75. Especificación de la tubería de la planta**

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro externo (m)	Diámetro interno (m)
1 "	0,0254	0,02415

### 5.4. Especificaciones del pasteurizador E-100.

#### 5.4.1. Especificaciones de las placas.

**Tabla 76. Especificaciones del pasteurizador E-100**

Equipo:	Pasteurizador
Tipo:	Placas
Número de placas totales	55
Superficie Total	1,695 m <sup>2</sup>
Superficie de intercambio de cada placa	0,036
Conexiones	1"

**NOTA:** Las especificaciones de las placas fueron requeridas para realizar varios cálculos en el pasteurizador, para más información se debe recurrir a la TABLA 30.

#### 5.4.2. Especificaciones del pasteurizador.

**Tabla 77. Especificaciones de la zona de calentamiento**

ZONA DE CALENTAMIENTO					
Servicio: Calentamiento	Lado Caliente		Lado Frío		Unidades
Fluido	LECHE		AGUA		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Cantidad	500		1000		L/h
Temperatura de trabajo	62	75	80	74	°C
Caída de presión	0,23		1,53		Bar
CARACTERISTICAS					
Densidad	1023		973,9		kg/m³
Viscosidad	1,117 e-03		5,76 e-04		kg/m.s
Calor específico	3824		4238		J/kg.K
Conductividad térmica	0,613		0,668		W/m.C
Calor intercambiado	7167				J/s
MLDT	8				°C
Número de placas	7				

**Tabla 78. Especificaciones de la zona de regeneración**

ZONA DE REGENERACION					
Servicio: Regeneración	Lado Caliente		Lado Frío		Unidades
Fluido	LECHE		LECHE		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Cantidad	500		500		L/h
Temperatura de trabajo	10	62	75	23	°C
Caída de presión	0,06		0,06		Bar
CARACTERISTICAS					
Densidad	1031		1029		kg/m³
Viscosidad	1,78 e-03		1,58 e-03		kg/m.s
Calor específico	3799		3805		J/kg.K
Conductividad térmica	0,583		0,591		W/m.C
Calor intercambiado	28478				J/s
MLDT	13				°C
Número de placas	39				

**Tabla 79. Especificaciones de la zona de enfriamiento**

ZONA DE ENFRIAMIENTO					
Servicio: Enfriamiento	Lado Caliente		Lado Frío		Unidades
Fluido	LECHE		AGUA		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Cantidad	500		1000		L/h
Temperatura de trabajo	23	17	15	18	°C
Caída de presión	0,16		0,61		Bar
CARACTERISTICAS					
Densidad	1036		998,43		kg/m³
Viscosidad	2,9e-03		1,26e-03		kg/m.s
Calor específico	3776		4188		J/kg.K
Conductividad térmica	0,547		0,597		W/m.C
Calor intercambiado	3266				J/s
MLDT	3,4				°C
Número de placas	5				

**Tabla 80. Especificación del tubo de retención**

Dimensión	Valor
Diámetro nominal (pulg)	1'
Diámetro externo (m)	0,0254
Diámetro interno (m)	0,02415
Longitud (m)	3

### 5.5. Especificaciones del pre calentador de leche.

**Tabla 81. Especificaciones del pre calentador E-210**

PRECALENTADOR E-210					
Variable		Tubo externo		Tubo interno	
Diámetro nominal		1 1/2'		1 '	
Diámetro interno (m)		0,0355		0,0229	
Diámetro externo (m)		0,0381		0,0254	
Longitud (m)		3			
Área de transferencia de calor (m)		0,120			
Servicio: Enfriamiento	Lado Caliente		Lado Frío		Unidades
Fluido	LECHE		AGUA		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Cantidad	500		1000		L/h
Temperatura de trabajo	17	47	74	62	°C
Caída de presión	0,013		0,24		Bar
CARACTERISTICAS					
Densidad	1034		979,6		kg/m³
Viscosidad	2,25E-03		5,87E-04		kg/m.s
Calor específico	3788		4218		J/kg.K
Conductividad térmica	0,566		0,597		W/m.C
Calor intercambiado	16382				J/s
MLDT	34,75				°C
Número de horquillas	2				

### 5.6. Especificaciones del fermentador.

**Tabla 82. Dimensiones del fermentador R-200**

Variable	Descripción	Valor	Unidades
DI <sub>R-200</sub>	Diámetro interno del tanque R-200	0,55	m
DE <sub>R-200</sub>	Diámetro externo del tanque R-200	0,55	m
H <sub>R-200</sub>	Altura del tanque R-200	0,55	m
e <sub>R-200</sub>	Espesor del tanque R-200	3	mm
V <sub>R-200</sub>	Volumen Total del tanque R-200	130,67	L
Aislante térmico		Espuma de poliuretano	
Espesor		2 cm	



**Tabla 83. Especificaciones del agitador del fermentador R-200**

Especificación	Descripción
Tipo de agitador	Ancla
Diámetro del agitador	0,539 m
Altura a la que se ubica el agitador	0,539 m
Velocidad de agitación	50 RPM
Potencia del agitador	25 W
Tiempo de agitación	1 hora

### 5.7. Especificaciones del enfriador de yogur.

**Tabla 84. Especificaciones del enfriador E-220**

ENFRIADOR E-220					
Variable		Tubo externo		Tubo interno	
Diámetro nominal		1 1/2'		1 '	
Diámetro interno (m)		0,0355		0,0229	
Diámetro externo (m)		0,0381		0,0254	
Longitud (m)		3			
Área de transferencia de calor (m)		0,120			
Servicio: Enfriamiento	Lado Caliente		Lado Frío		Unidades
Fluido	YOGUR		AGUA		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Cantidad	100		250		L/h
Temperatura de trabajo	40	20	15	22	°C
Caída de presión	0,23		0,057		Bar
CARACTERISTICAS					
Densidad	1114		997,99		kg/m³
Viscosidad	1,22E-01		1,21E-03		kg/m.s
Calor específico	3786		4186		J/kg.K
Conductividad térmica	0,563		0,600		W/m.C
Calor intercambiado	2499				J/s
MLDT	10,1				°C
Número de horquillas	7				

### 5.7. Especificaciones de bombas.

**Tabla 85. Especificaciones del enfriador E-220**

<b>BOMBA</b>	<b>TIPO DE BOMBA</b>	<b>CAUDAL [L/h]</b>	<b>FLUIDO</b>	<b>PRESIÓN [bar]</b>	<b>CNPA<sub>D</sub> [m]</b>
P-111	Centrifuga	500	Leche	0,41	8,42
P-112	Centrifuga	1000	Agua fría	0,58	7,91
P-113	Centrifuga	1000	Agua caliente	1,75	3,7
P-114	Centrifuga	250	Agua fría	0,24	5,13
P-115	Desplazamiento positivo	100	Yogur	0,23	-

### 5.8. Especificaciones de la envasadora.

**Tabla 86. Especificaciones de la envasadora PK-210**

<b>Capacidad</b>	100 L/h
<b>Dosificación</b>	500 – 1000 cm <sup>3</sup>
<b>Tipo Fluido a envasar</b>	Líquido
<b>Potencia</b>	A definir por el proveedor
<b>Envases</b>	Recipientes plásticos o fundas
<b>Nivel de automatización</b>	Semi-automático o manual
<b>Dimensiones</b>	A definir por el proveedor

### 5.9. Especificaciones de la cámara de frío.

**Tabla 87. Especificaciones de la cámara fría CR-210**

<b>Capacidad</b>	120 L
<b>Temperatura inicial</b>	20 °C
<b>Temperatura de refrigeración</b>	4 °C
<b>Tipo de alimento a refrigerar</b>	Yogur en funda o envase
<b>Potencia</b>	A definir por el proveedor
<b>Dimensiones</b>	A definir por el proveedor

De acuerdo con Baca G (2001), en su libro “Evaluación de Proyectos” se debe agregar un 8% al costo total de la inversión para considerar la implementación de la planta, lo cual se indica en la tabla 72.

**Tabla 88. Estimación de costos totales**

<b>Descripción</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Equipos principales	24600,00
Equipos auxiliares y accesorios	2875,00
<b>Subtotal</b>	25,100
Ingeniería e implementación (8%)	2008,00
<b>TOTAL</b>	<b>27108,00</b>

## **6. DISCUSIÓN**

### **6.1. Caracterización de la materia prima.**

- Se ha realizado el análisis de la composición de la materia prima como se adjunta en el ANEXO A, debido a la necesidad de calcular las propiedades térmicas de la leche para el diseño de los equipos en los cuales se realiza transferencia de calor, estos datos fueron reportados en la TABLA 11.
- La determinación de las propiedades que no se pueden calcular mediante ecuaciones se realizó de manera experimental para una sola muestra, en la práctica la composición y propiedades de la materia prima puede variar; aunque no significativamente debido a que las características del ganado de toda la zona andina son similares. Como se indicó en la teoría las propiedades y composición dependen en su mayoría del tipo del ganado, así como de la zona en donde se encuentre.

### **6.2. Escalado.**

Para el escalado se incrementó el volumen en 100 veces tomando en cuenta que una planta piloto debe trabajar con bajas cantidades de materia prima, además del costo de la leche y dificultad al momento de conseguirla.

### **6.3. Diseño del pasteurizador.**

- La variación de caudal en un intercambiador de placas es proporcional a la cantidad de placas que lo componen y a su vez al área del mismo, es decir, cuando se incrementa el caudal el número de placas aumenta y cuando se reduce el caudal el número de placas disminuye.
- La zona de regeneración en el pasteurizador es tiene un área considerablemente mayor que las zonas de enfriamiento y calentamiento debido a las propiedades térmicas de la leche, que hacen que disminuya la transferencia de calor en esta área. De los cálculos se ha comprobado que la turbulencia a su vez disminuye cuando el área incrementa lo cual dificulta el intercambio de calor cuando el fluido es el mismo en los dos lados de la placa.

- El intercambio de calor en un intercambiador de placas depende en gran medida de la separación entre las placas, ya que una separación mínima incrementa la turbulencia lo que favorece al incremento del coeficiente individual de transferencia de calor por convección.
- El equipo ha sido dimensionado en base a un tipo específico de placa consultado en una empresa fabricante (DUDADIESEL); si se cambia de placa o configuración se modifica toda la estructura del intercambiador. En las tablas 78, 79 y 80 se detalla una hoja de especificación para cada zona.
- Se ha incluido un análisis del número de unidades de transferencia (NTU), para corroborar la validez de un intercambiador de calor en el proceso; obteniéndose valores de entre 1,5 y 4 unidades de transferencia, lo que demuestra que los intercambiadores están plenamente justificados debido a que este número está directamente relacionado con la eficiencia. Para valores pequeños la eficiencia crece rápidamente; sin embargo al incrementar el valor de NTU la eficiencia se vuelve constante, lo que económicamente no representa el uso de un intercambiador de calor.

#### **6.4. Diseño del fermentador.**

- La fermentación láctica con cultivo liofilizado tiene un tiempo de reacción más elevado que la fermentación con inóculo reportando un tiempo de 5 horas y media en comparación a la fermentación con inóculo que según la bibliografía (TETRA PAK) se encuentra alrededor de 3 horas debido a que se requiere una mayor energía de activación por parte de los microorganismos que deben adaptarse primero al nuevo medio antes de empezar a sintetizar ácido láctico.
- Para evitar costos de operación en el fermentador ha sido necesario diseñar un aislamiento para recubrir el tanque y evitar pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. La temperatura final sin un aislante térmico decrece desde 45 °C hasta 20 °C; teniendo una variación de casi 25 °C. Al incluir un aislante de 2 cm de espesor se ha logrado disminuir la variación de temperatura hasta obtener una variación de 4 °C que resulta poco representativa ya que está dentro del rango de temperaturas en el cual reaccionan los microorganismos

#### **6.5. Diseño de intercambiadores de calor.**

- Se ha obtenido un intercambiador de tubo concéntrico de 2 horquillas con un caudal de 500 L/h, para el pre calentamiento de la leche antes del ingreso al fermentador, con un flujo de agua equivalente al doble del caudal de leche seleccionado.

- Para el enfriamiento del yogur se ha obtenido un intercambiador de tubo concéntrico de 7 horquillas con un caudal de 100 L/h, número considerablemente más alto en comparación al intercambiador para el calentamiento de la leche que tiene un mayor caudal, esto se debe al bajo coeficiente de transferencia obtenido debido a la viscosidad mucho más elevada del yogur, lo que reduce la turbulencia significativamente y disminuye la transmisión de calor en esta zona.

#### **6.6. Especificaciones de otros equipos.**

- Las bombas han sido seleccionadas en base a la caída de presión generada en los distintos intercambiadores como se muestra en la TABLA 86, obteniéndose caídas de presión alrededor de hasta 1,75 Bars en el caso de la bomba P-113, la cual es la encargada de superar la presión generada en el pasteurizador para el agua caliente debido a la alta turbulencia generada en dicho equipo.
- Como resultado del caudal seleccionado para el enfriador de yogur se ha especificado una envasadora que cumpla el mismo caudal que el de la zona de enfriamiento de yogur debido a que es un proceso continuo.
- Se ha especificado una cámara de frío para el producto terminado la cual debe cumplir con el objetivo de disminuir y mantener constante la temperatura del producto en 4 °C, especificaciones como la potencia de la cámara o el tamaño solo pueden ser establecidas por el fabricante

#### **6.7. Estimación de costos de operación.**

- Debido a la necesidad de comprar equipos ya fabricados, no se ha podido establecer la potencia requerida de los equipos, únicamente se ha calculado la potencia de los tanques agitados. Por esta razón no se ha realizado un estudio sobre los costos de operación de la planta; este estudio se puede realizar teniendo las potencias de cada uno de los equipos involucrados en el proceso.

## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1. Caracterización de la materia prima.**

Al observar los resultados de la caracterización de la materia prima se puede concluir que están dentro del rango descrito en el capítulo 1, Tabla 2 (DAIRY PROCESSING HANDBOOK, Tetra Pak Processing Systems); sin embargo se puede usar tanto leche comercial como cruda para una práctica de laboratorio ya que el tamaño del equipo no varía de manera significativa con el cambio de composición.

### **7.2. Escalado.**

Se ha obtenido una planta que está en la capacidad de tratar 100 Litros de leche y de acuerdo con las cantidades usadas de las otras materias primas estaría en capacidad de producir 117 Litros de yogur sin contar con las pérdidas en cada tramo de tubería.

### **7.3. Diseño del pasteurizador.**

- El pasteurizador dimensionado funciona como un proceso continuo con capacidad para procesar un caudal de 500 Litros/h debido al gran aporte que representa un equipo de estas características en la formación de un estudiante de ingeniería ya que combina 3 intercambiadores de placas con diferentes suministros de servicios como agua fría y agua caliente en un solo equipo. Este equipo trabajaría únicamente hasta completar la carga inicial de leche (100 L), proceso que tardaría 12 minutos.
- Se puede dimensionar un equipo para un proceso por lotes pero el tiempo de una práctica se incrementaría considerablemente, se puede anexar una unidad de este tipo fácilmente con los mismos suministros y la misma bomba.

### **7.4. Diseño del fermentador.**

- Se debe usar una chaqueta de calentamiento con agua o vapor para el fermentador; sin embargo se puede usar aislamiento térmico cuando se quiere reducir los costos de producción y fabricación del equipo.

- Se ha diseñado un equipo con capacidad para el procesamiento de 106 L de yogur, el cual está provisto de un aislante térmico de 2 cm de espesor (espuma de poliuretano) el cual disminuye las pérdidas de calor hacia el ambiente, esto permite que haya una menor variación en la temperatura mientras dura la fermentación láctica.

#### **7.5. Diseño de los intercambiadores de calor.**

- El coeficiente total de transmisión de calor es mucho más pequeño en intercambiadores de calor de tubo concéntrico si lo comparamos con el obtenido en un intercambiador de calor de placas debido a la turbulencia generada al interior del equipo.
- Se selecciona un intercambiador de calor de tubo concéntrico frente a un intercambiador de calor de placas en la etapa de pre-calentamiento de la leche debido a su costo más bajo; además, un intercambiador de placas no se justifica debido a que constaría de un número reducido de placas (no más de 7 como se observa en la zona de calentamiento del pasteurizador) por el bajo caudal que se maneja, por lo que no se encontraría un equipo en el mercado con estas características.
- En la zona de enfriamiento se ha seleccionado un intercambiador de calor de tubo concéntrico debido a la alta viscosidad del yogur, un intercambiador de placas está diseñado para trabajar únicamente con líquidos de baja viscosidad. El flujo de este intercambiador ha sido reducido a 100 L/h para que se pueda acoplar una bomba de desplazamiento positivo y para disminuir el costo de la envasadora.



## **8. RECOMENDACIONES**

### **8.1. Pasteurizador.**

- Se recomienda diseñar una línea de limpieza CIP para evitar el daño de los equipos y aumentar la vida útil de los mismos, este trabajo abarca únicamente el diseño de la línea de producción más no su limpieza.
- Se recomienda la adquisición del equipo completo de pasteurización en lugar de 3 intercambiadores separados, el cual incluye las 3 etapas calculadas en el presente trabajo, así como el tubo de retención y auto calentamiento de agua.

### **8.2. Fermentador.**

- Se recomienda la construcción del equipo como un tanque individual de acero inoxidable y no la compra de una marmita comercial para reducir los costos de producción con el aislante térmico en lugar del calentamiento con agua o vapor.
- Es necesario trabajar con equipos fabricados en acero inoxidable AISI 316 o AISI 304 de la línea alimenticia ya que al ser un producto de consumo humano debe regirse a estándares nacionales e internacionales y evitar la contaminación en cada etapa.

### **8.3. Especificación de otros equipos.**

- En cuanto la planta esté instalada se puede añadir un homogenizador que por su elevado costo no se ha considerado en este trabajo, así como una línea de estandarización con una maquina centrífuga, la misma que garantizará reducir la variabilidad del proceso al momento de obtener el producto final ya que el contenido de grasa normalizado nos garantiza un producto final siempre con las mismas características.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TETRA PAK PROCESSING SYSTEMS, Dairy Processing Handbook, Lund, Suecia, 1995, p. 2.
- [2] IBID [1] p. 2.
- [3] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA., “Curso online de Lácteos.” Bogotá, 2013. (Fecha de consulta: 20 Febrero 2014. Disponible en: <[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/lacteos/flash/interfaz\\_lacteos\\_m1.swf/](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/lacteos/flash/interfaz_lacteos_m1.swf/)>.
- [4] SEMORILE CORP, (Diapositivas en línea), Modificado última vez por: HOLLMAN Axel, “Seminario # 1: Esterilización y Bioseguridad”, Asunción, 2007 (Fecha de consulta: 03 de Julio 2014). Disponible en:< <http://slideplayer.es/slide/1052660/>> Diapositiva 6.
- [5] IBID [4]. Diapositiva 10.
- [6] IBID [4]. Diapositiva 2.
- [7] MENDIETA, Danny Gabriel. Diseño de una línea piloto HTST para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería en Alimentos (ESPOL). Trabajo de Grado. Escuela Superior Politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. p. 26
- [8] NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 9:2012, Leches fermentadas: Requisitos, Segunda revisión, Quito, 2012 p.2.
- [9] IBID [1] p. 233.
- [10] IBID [1] p. 239.

- [11] BAUMAN, Guillermo; LONGO, Emiliano, “El yogur: Un Alimento Esencial”. 21 Febrero 2014. p. 6. Disponible en:  
<<http://www.monografias.com/trabajos38/yogurt/yogurt2.shtml#ixzz2-vaBJuipc>>.
- [12] ALFA LAVAL. Catálogo intercambiador de calor de placas M3. (Fecha de consulta: 15 de Julio 2014). Disponible en: <<http://t-solucion.com/wp-content/uploads/2013/01/Catalogo-modelo-M3.pdf/>>.
- [13] IBID [7]. p. 28
- [14] KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de Calor. Editorial McGraw Hill. México D.F. 1999. p. 132.
- [15] IBID [14]. p. 155
- [16] IBID [1] p. 161
- [17] IBID [14].
- [18] TETRA PAK PROCESSING SYSTEMS, Dairy Processing Handbook, Suecia, 1995, p. 161
- [19] McCABE, Warren L; SMITH, C; Julian. HARRIOT, Peter. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw Hill. Madrid, Cuarta Edición, Madrid. 1991. pp. 242-243.
- [20] ULLMANN’S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMESTRY, Wiley-VCH, Weinheim, 2010, séptima edición, Capítulo de agitación, p.10.
- [21] IBID [19]. p. 243
- [22] IBID [18]. p. 246.
- [23] IBID [22]. p. 211

- [24] INGENIERIA CIVIL, Portal Virtual, “Bombas de desplazamiento positivo”, Bogotá, 2013 (Fecha de consulta: 08 Julio 2014). Disponible en: <  
<http://www.ingenierocivilinfo.com/2011/11/bombas-de-desplazamiento-positivo.html> />.
- [25] CRANE, División de Ingeniería. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial McGraw Hill. México D.F. 1991. p. 4.
- [26] IBID [25]. p. 5
- [27] IBID [25] p. 8.

## **BIBLIOGRAFÍA**

BACA, Gabriel. Evaluación de proyectos., Editorial McGraw Hill, Séptima Edición, México. 2013.

BAUMAN, Guillermo; LONGO, Emiliano, El yogur: Un Alimento Esencial. 21 Febrero 2014. Disponible en: < <http://www.monografias.com/trabajos38/yogurt/yogurt2.shtml#ixzz2-vaBJuipc>>.

CRANE, División de Ingeniería. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Editorial McGraw Hill. México D.F. 1991. p. 8.

GODFELLOW, Materiales de investigación, Huntingdon, 2014. [Fecha de consulta: 2 de Junio 2014]. Disponible en: <<http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>>

KERN, Donald Q. Procesos de transferencia de Calor. Editorial McGraw Hill. México D.F. 1999.

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 9:2012, Leches fermentadas: Requisitos, Segunda revisión, Quito, 2012.

McCABE, Warren L; SMITH, C; Julian. HARRIOT, Peter. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw Hill. México D.F. 1991.

McCARTHY O.J., SINGH H. Physico-chemical properties of milk. In: McSweeney P.L.H. & Fox P.F. (Eds.). Advanced Dairy Chemistry. Springer Science+Business Media, New York, USA, 2009.

MENDIETA, Danny Gabriel. Diseño de una línea piloto HTST para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería en Alimentos (ESPOL). Trabajo de Grado. Escuela Superior Politécnica del litoral. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción.

TABOAS, Francisco, Estudio del proceso de ebullición agua-amoniaco en un intercambiador de placas para equipo de refrigeración por absorción, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, 2006.

TETRA PAK PROCESSING SYSTEMS, Dairy Processing Handbook, Lund, Suecia, 1995

ULLMANN'S, ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Wiley-VCH, séptima edición, Weinheim, 2010.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA., "Curso online de Lácteos." [En línea]. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2013. [Fecha de consulta: 20 Febrero 2014]. Disponible en:  
<[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/lacteos/flash/interfaz\\_lacteos\\_m1.swf](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/lacteos/flash/interfaz_lacteos_m1.swf)>.

# **ANEXOS**

## **ANEXO A. Diagrama de flujo del proceso.**



## ANEXO B. Resultados del análisis de la leche cruda.



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE ALIMENTOS  
INFORME DE RESULTADOS

INF-70B-AL-22092  
ORDEN DE TRABAJO No 44341

SOLICITADO POR:	RAMIREZ CRISTIAN
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	MANTA DUCHICELA CALDERON
MUESTRA:	LECHE
DESCRIPCIÓN:	LECHE CRUDA
LOTE:	---
FECHA DE ELABORACIÓN:	01/04/2014
FECHA DE VENCIMIENTO:	9:31
FECHA DE RECEPCIÓN:	01/04/2014
HORA DE RECEPCIÓN:	9:31
FECHA DE ANÁLISIS:	01-04/04/2014
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	08/04/2014
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	
COLOR:	Característico
OLOR:	Característico
ESTADO:	LIQUIDO
Contenido declarado : 1.5 L	Contenido encontrado: 1.5 L
OBSERVACIONES:	
Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra entregada por el cliente al OSP.	
MUESTREO POR:	Cliente

### INFORME

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADO	METODO
Humedad	%	86.94	MAL-13/ AOAC 925.10
Grasa	%	4.19	MAL-03/ AOAC 991.36
* Densidad de líquidos (20°C)	g/ml	1.0361	MAL-58
* Viscosidad spindle 61 RPM 100	cP	5.94	MAL-67 Brookfield

"Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 1C 04-002"

"Los ensayos marcados con ( \* ) no están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"



*Ana María Hidalgo*  
Bioq. Ana María Hidalgo  
JEFE ÁREA DE ALIMENTOS



1 / 1

RAL-4.1-04

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33  
Telefax: 3216-740 - Web: [www.facquimuec.edu.ec](http://www.facquimuec.edu.ec) - E-mail: [laboratoriososp@hotmail.com](mailto:laboratoriososp@hotmail.com)



## ANEXO C. Análisis de la materia prima y pasteurización.



Figura C.1. Reómetro Anton Paar.



Figura C.2. Pasteurización batch de la leche cruda.

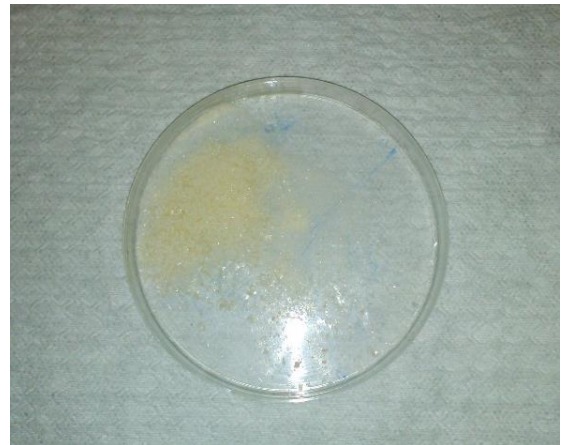


Figura C.3. Cultivo Liofilizado para la preparación de yogur.

## ANEXO D. Elaboración y análisis del yogur.



Figura D.1. Fermentación láctica de la leche.



Figura D.2. Autoclave TRIDENT Medical Corp. CEO434.

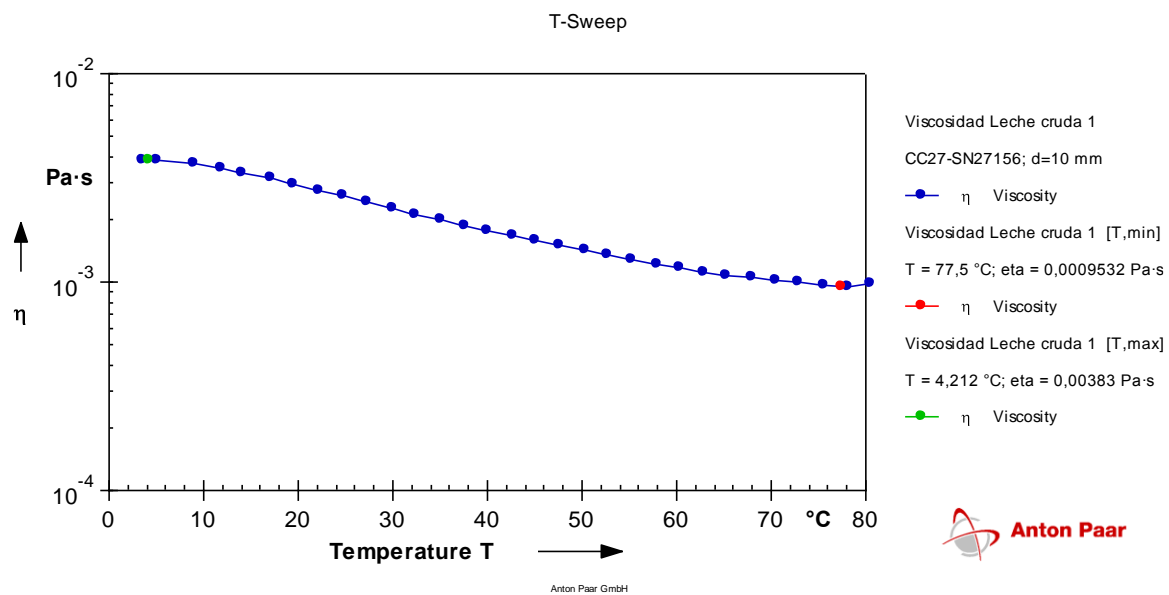


Figura D.3. Medición de pH del yogur.

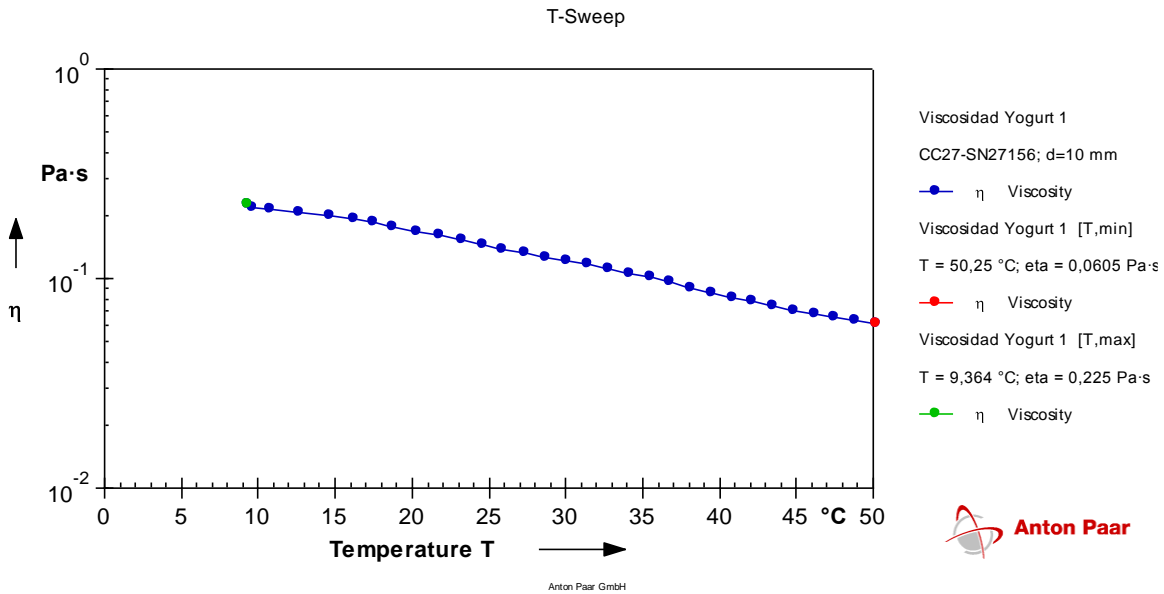


Figura D.4. Yogur elaborado en el laboratorio.

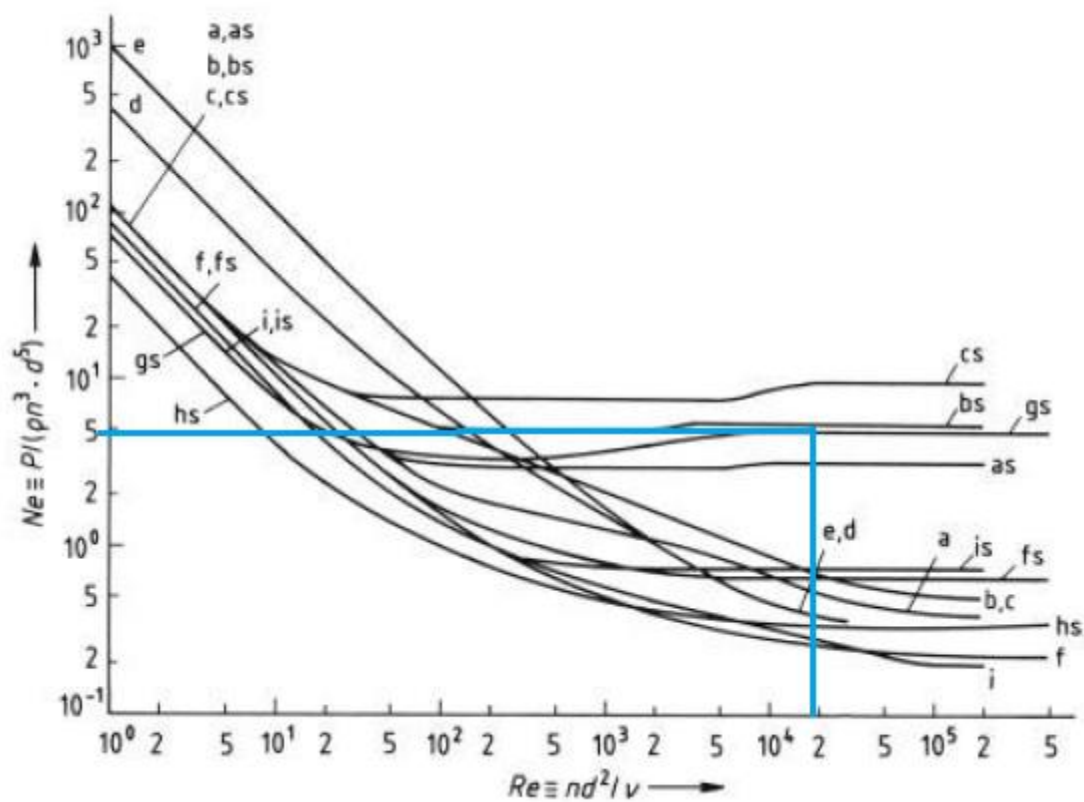
## ANEXO E. Recopilación de datos de viscosidad de la leche en función de la temperatura.



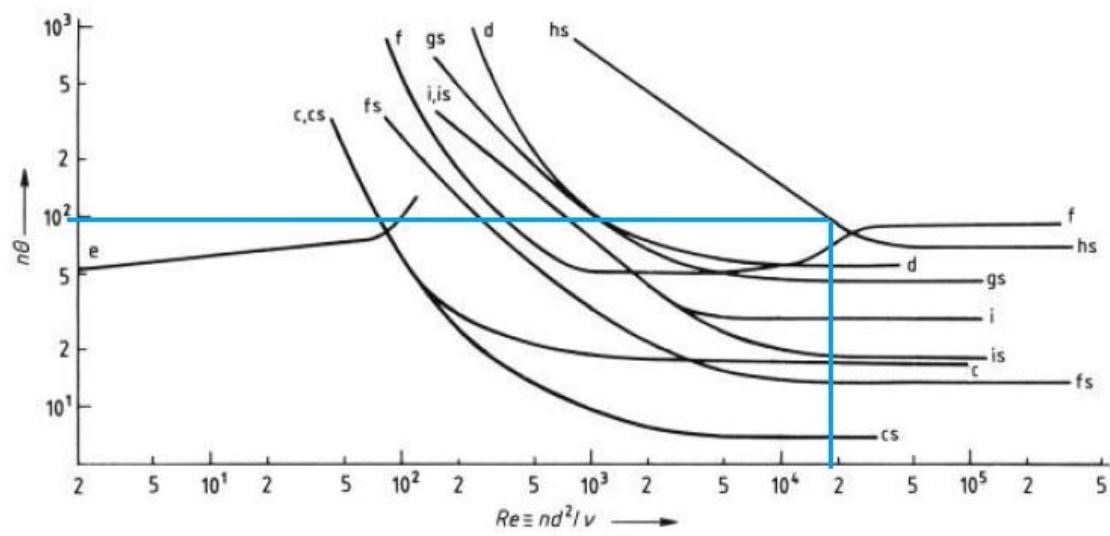
**ANEXO F. Recopilación de datos de viscosidad del yogur en función de la temperatura.**



**ANEXO G. Trazado para la determinación del número de potencia del agitador en el tanque V-110.**

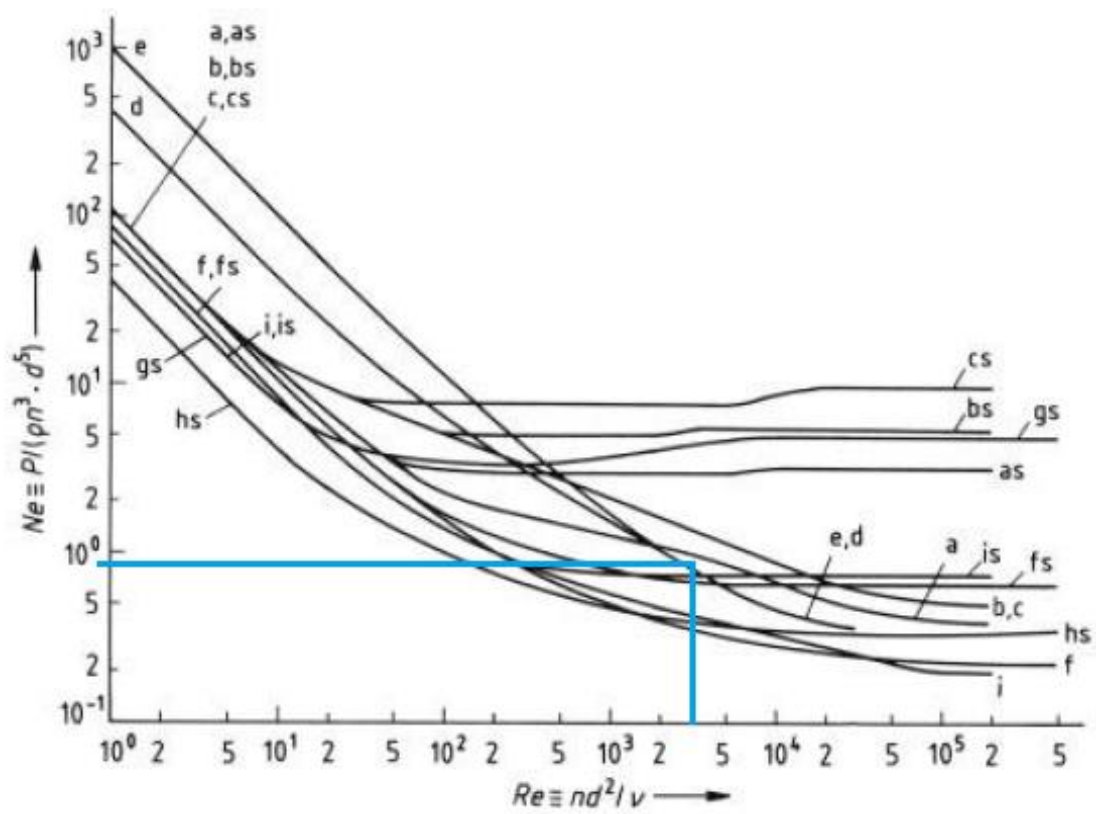


**ANEXO H. Trazado para la determinación del tiempo de homogenización en el tanque V-110**





**ANEXO J. Trazado para la determinación del número de potencia del agitador del tanque R-200**





## ANEXO K. Constantes para convección en superficies isotermas.

**TABLA 7.1**

Constantes para utilizarlas con la Ec. (7.25) para superficies isotermas.

Geometría	$Gr_f Pr_f$	$C$	$m$	Ref(s).
Planos y cilindros verticales	$10^{-1}-10^4$	Usar Fig. 7.7	Usar Fig. 7.7	4
	$10^4-10^9$	0,59	$\frac{1}{4}$	4
	$10^9-10^{13}$	0,021	$\frac{2}{5}$	30
	$10^9-10^{13}$	0,10	$\frac{1}{3}$	22, 16†
Cilindros horizontales	$0-10^{-3}$	0,4	0	4
	$10^{-3}-10^4$	Usar Fig. 7.8	Usar Fig. 7.8	4
	$10^4-10^9$	0,53	$\frac{1}{4}$	4
	$10^9-10^{12}$	0,13	$\frac{1}{3}$	4
	$10^{-10}-10^{-2}$	0,675	0,058	76†
	$10^{-2}-10^2$	<u>1,02</u>	<u>0,148</u>	76†
	$10^2-10^4$	0,850	0,188	76
	$10^4-10^7$	0,480	$\frac{1}{4}$	76
	$10^7-10^{12}$	0,125	$\frac{1}{3}$	76
Superficie superior de placas calientes o superficie inferior de placas frías	$2 \times 10^4-8 \times 10^6$	0,54	$\frac{1}{4}$	44, 52
Superficie superior de placas calientes o superficie inferior de placas frías	$8 \times 10^6-10^{11}$	0,15	$\frac{1}{3}$	44, 52
Superficie inferior de placas calientes o superficie superior de placas frías	$10^5-10^{11}$	0,27	$\frac{1}{4}$	44, 37, 75
Cilindro vertical, altura = diámetro. Longitud característica = diámetro	$10^4-10^6$	0,775	0,21	77
Sólidos irregulares, longitud característica = distancia que una partícula fluida recorre en la capa límite	$10^4-10^9$	0,52	$\frac{1}{4}$	78